

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

5

2026

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

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

№ 5, 2026 год

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

Vol. 5. 2026

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	08.05.2026
Выход в свет	21.05.2026

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,51. Уч.-изд. л. 17,75. Тираж 35 экз. Заказ № 62

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	08.05.2026

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Строкова Валерия Валерьевна, проф. РАН, чл.-корр. РААСН, 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).

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriya V. Stroikova, Professor of the Russian Academy of Sciences, 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).

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

Ледяйкин Н.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАСТАЕМОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ МИКРООРГАНИЗМАМИ-БИОДЕСТРУКТОРАМИ ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

8

Василькин А.А., Зубков Г.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ГАЙКИ ДЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

19

Петров М.М.

ВЛИЯНИЕ ХЛАДАГЕНТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

32

Ткач Л.В., Гольцов А.Б., Михайлов А.И., Шалпегин Д.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШИБЕРНЫХ ЗАДВИЖЕК В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

44

Чечель И.П.

ВНЕУРОЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, КАК ДОМИНИРУЮЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ТИПОЛОГИИ СОВРЕМЕННЫХ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

53

Ткаченко С.Г.

СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА РЕВИТАЛИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ

75

Адошина А.В.

МЕЖДУ РЕАЛЬНОСТЬЮ И УТОПИЕЙ: СПЕКУЛЯТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАК МЕТОД АРХИТЕКТУРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

86

Пириева Л.Ю., Тарасенко В.Н., Пириев Ю.С., Васильев Д.А.

СОВРЕМЕННЫЕ ФАСАДНЫЕ СИСТЕМЫ КАК ДОМИНАНТЫ РЕКРЕАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

100

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Цюе У., Рачков М.Ю., Гапоненко Е.В.

УПРАВЛЕНИЕ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ РОБОТА МЕТОДОМ АКТИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ И СТРАТЕГИЕЙ НАСЫЩЕНИЯ

115

Гринёк А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Башкатов В.А., Перелыгин Д.Н.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ СУДОВОГО ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

125

Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Минасян А.Г., Волков М.И.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСКОВ СОШНИКОВ ПОСЕВНЫХ МАШИН

134

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Ledyaykin N.V.

STUDY OF THE FOULING OF MODIFIED CEMENT COMPOSITES
BY BIODEGRADING MICROORGANISMS UNDER EXPOSURE
TO SOIL CONDITIONS 8

Vasilkin A.A., Zubkov G.V.

STRESS-STRAIN STATE OF SLIP-CRITICAL CONNECTIONS IN METAL
STRUCTURES, WITH REGARD TO THE SPECIFICS OF BOLT TENSION CONTROL 19

Petrov M.M.

THE INFLUENCE OF REFRIGERANT ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS
OF AN AIR HEAT PUMP IN AIR HANDLING UNITS 32

Tkach L.V., Goltsev A.B., Mikhailov A.I., Shalpegin D.S.

RESEARCH OF LOCAL RESISTANCE OF SLIDING DOORS IN VENTILATION
AND ASPIRATION SYSTEMS 44

Chechel I.P.

EXTRACURRICULAR ACTIVITIES AS A DOMINANT FACTOR
IN THE DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF MODERN
SCHOOL BUILDINGS 53

Tkachenko S.G.

MODERN PRACTICE OF REVITALIZATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT
OF INDUSTRIAL LANDSCAPES 75

Adonina A.V.

BETWEEN REALITY AND UTOPIA: SPECULATIVE DESIGN AS A METHOD
OF ARCHITECTURAL FORECASTING 86

Pirieva L.Y., Tarasenko V.N., Piriev Y.S., Vasilov D.A.

MODERN FACADE SYSTEMS AS DOMINANTS OF RECREATIONAL SPACE 100

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Wu Que, Rachkov M.Yu., Gaponenko E.V.

CONTROL OF ROBOT RECONFIGURATION USING ACTIVE SCANNING METHOD
AND SATURATION STRATEGY 115

Grinek A.V., Fishenko A.M., Boychuk I.P., Bashkatov V.A., Perelygin D.N.

PREDICTION OF PISTON RING WEAR IN MARINE MAIN ENGINE USING NEURAL
NETWORKS 125

Pastukhov A.G., Timashov E.P., Minasyan A.G., Volkov M.I.

TRIBOTECHNICAL PROPERTY STUDIES DISKS OF PLOUGHSHARES
OF SOWING MACHINES 134

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-8-18

Ледяйкин Н.В.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАСТАЕМОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ МИКРООРГАНИЗМАМИ-БИОДЕСТРУТОРАМИ ПРИ ЭКСПОЗИЦИИ В ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Биологическая коррозия представляет собой один из ключевых факторов, существенно снижающий надежность и долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Экспериментально подтверждено, для повышения устойчивости материалов к биодеструкции рекомендуется реализация двух взаимодополняющих технологических решений: инкорпорирование биологически активных веществ в состав материала на этапе производства и постпроизводственная обработка поверхностей биопрепаратами, формирующими защитный барьер против микробиологического воздействия. Объектом научного исследования служит композитный материал на основе сухой цементной штукатурной смеси, в состав которой интегрированы специализированные антисептические агенты («Санатекс. Универсал», «Антиплесень. Лакра» и «DALI® Универсальный антисептик»), обеспечивающие защиту от биоповреждений. В рамках исследования поставлена цель – установить таксономический профиль микробных сообществ, формирующихся на поверхности цементных композитов с различными антисептическими добавками и провести сравнительный анализ биоцидной активности исследуемых модифицирующих компонентов. Модификация разработанных композиций проводилась двумя методами. В первом случае антисептическая добавка вводилась непосредственно вготавливаемую композицию, которая состояла из сухой штукатурной смеси и воды, а во втором затвердевшие бездобавочные образцы пропитывались антисептическим препаратом. Исследуемые цементные композиты были выдержаны 1 год в грунтовых условиях. С помощью микробиологических исследований идентифицирован видовой состав потенциальных биодеструкторов преобладающих на поверхности материалов. Определена микробиологическая эффективность используемых антисептических добавок. Выявлено, что при обоих методах получения образцов защитных цементных покрытий лучшие результаты были получены с биоцидным препаратом «Санатекс. Универсал», при котором наблюдалось наименьшее количество микроорганизмов, заселившихся и развивающихся на разработанных материалах.

Ключевые слова: цементные композиты, антисептические добавки, бактерии, плесневые грибы, биостойкость.

Введение. Цементные композиты – одни из наиболее широко используемых строительных материалов с многовековой историей применения. Конструкции на их основе считаются неразрушимыми за счёт более длительного жизненного цикла в сравнении с другими строительными изделиями, но их долговечность может быть снижена по ряду причин, таких как низкое качество проектирования и строительства, а также неблагоприятные условия эксплуатации [1, 2].

Многие архитектурные и строительные конструкции зданий подвергаются биодegradации при контакте с почвой, водой, сточными водами, а также сельскохозяйственной продукцией и отходами. Биодеструкция – это отрицательные изменения в материале, вызванные живыми организмами. Они образуют специфические сообщества, которые по-разному взаимодействуют с минеральными материалами и внешней средой. Это

сложное явление происходит в сочетании со многими физическими и химическими деструктивными процессами. Таким образом, трудно отличить степень ущерба, вызванного биотическими факторами, от ущерба, вызванного абиотическими [3].

Грунт является ключевым источником биодеструкторов, поскольку его формирование и существование тесно связаны с деятельностью живых организмов, активность которых напрямую влияет на процессы биокоррозии, особенно в углублённых и наземных инженерных сооружениях, таких как фундаменты, стены зданий, портовые и морские сооружения, мосты, резервуары, трубопроводы, градирни, элеваторы [4].

Интенсивный рост микроорганизмов является причиной накопления агрессивных биогенных веществ на различных конструкциях и строительных материалах, включая цементные композиты.

Локализация микроорганизмов может быть, как на поверхностях, так и внутри строительных материалов. Симбиоз микроорганизмов с материалом и внешней средой приводит к стимулированию процессов биологической коррозии в нём [3]. В процессах биоповреждения могут участвовать микроорганизмы всех основных таксономических групп, включая бактерии, грибы, дрожжи, водоросли и лишайники. При этом данные микроорганизмы могут реализовывать своё деструктивное воздействие изолированно и в рамках синергетических взаимодействий. Метаболическая деятельность микроорганизмов приводит к выделению в окружающую среду минеральных и органических кислот и других агрессивных реагентов (ферментов) [5, 6].

Основными причинами возникновения биокоррозии строительных материалов, изделий и конструкций являются три процесса: механический (деструкция материала вследствие прорастания спор и гифов), ассимиляционный (разрушение материала за счёт использования микроорганизмами компонентов цементной матрицы в качестве источников питательных веществ и энергии), диссимиляционный (растворение компонентов цементного камня в результате взаимодействия вяжущего вещества с агрессивными продуктами жизнедеятельности микроорганизмов) [1, 7]. Данные процессы часто действуют совместно, усугубляя негативные последствия друг друга. Механическое повреждение создаёт дополнительные пути проникновения жидкостей и газов, что усиливает химическое и бактериальное воздействие. Ассимиляция компонентов цементной матрицы также способствует образованию пустот и каналов, облегчающих доступ влаги и микроорганизмов к внутренним слоям материала.

Важно знать, механизмы биодegradации материалов, поскольку это позволяет повысить эксплуатационную надёжность зданий и сооружений при воздействии на них биологически агрессивных сред. Биологическая коррозия включает три стадии: заселение и прикрепление (адсорбция) к поверхности материалов, формирование колоний микроорганизмов и аккумуляция метаболитов, совместного воздействия микробов-деструкторов и условий внешней среды (высокой влажности, температурных колебаний, наличия агрессивных химических реагентов) [8–10]. Кинетика биокоррозионного разрушения материала находится в прямой зависимости от совокупности следующих взаимосвязанных факторов: специфики структурной организации и химического состава используемых материалов, технологических параметров производственного цикла,

уровня физического износа, наличия органических загрязняющих агентов, наличия биозащитных добавок, модифицирующих устойчивость материала [11, 12].

С точки зрения экономической эффективности и ресурсозатрат, превентивные меры по предотвращению биологической коррозии существенно превосходят мероприятия по устранению уже возникших повреждений. Для эффективной защиты строительных материалов от биоповреждений необходимо применение многоуровневой системы профилактических мероприятий.

Выбор методов и средств защиты материалов осуществляется на основе анализа трёх ключевых параметров: физико-химических характеристик защищаемого объекта, видового состава потенциально опасных микроорганизмов-деструкторов и специфических условий эксплуатации строительных конструкций, что позволяет существенно увеличить долговечность и надёжность строительных конструкций, минимизируя риски биокоррозионных поражений. Профилактика биокоррозии цементных композиций эффективно реализуется путём создания физического барьера между материалом и агрессивной средой. Данный подход предполагает нанесение на поверхность композитов биостойких покрытий – штукатурных смесей, лакокрасочных составов, либо выполнение облицовки плиткой, что препятствует непосредственному контакту микроорганизмов с материалом [13–15].

На современном рынке как в России, так и за рубежом представлено множество типов биоцидных препаратов (антисептические добавки, фунгициды, альгициды, микробиоцидные добавки), различающихся по принципу действия, сфере применения [16–18]. Выбор конкретно типа биоцида должен основываться на особенностях объекта, климатических условиях региона, характеристик самого материала и ожидаемых нагрузках на конструкцию [16]. Важно учитывать совместимость препаратов с материалами, экологичность используемых средств и соблюдение санитарных норм.

С позиции строительной биотехнологии, оптимизация защиты цементных композитов от биокоррозии предполагает тщательный отбор биоцидных агентов на основе их спектра действия, токсикологических характеристик и совместимости с матрицей материала, а также строгое соблюдение технологических параметров применения (концентрация, метод введения, условия отверждения). Реализация данной стратегии позволяет достичь: значительного повышения биостойкости цементных материалов за счет

ингибирования роста и метаболизма микроорганизмов; увеличения эксплуатационного ресурса конструкций благодаря предотвращению биодеструкции; снижения совокупных затрат на содержание объектов благодаря сокращению частоты ремонтных работ и продления межремонтных периодов.

Цель работы заключалась в определении таксономического состава биодеструкторов, колонизирующих поверхность экспериментальных образцов и анализе эффективности модифицирующих добавок плане повышения биорезистентности цементных композитов к воздействию почвенной микробиоты.

Задачи направленные для достижения цели исследования:

- разработка и оптимизация модифицированных составов цементных композитов антисептическими добавками различного типа;
- установление видового разнообразия микроорганизмов, выделенных с поверхности образцов, находящихся в течении 1 года в траншее, посредством стандартных микробиологических методов выделения и идентификации;
- характеристика микробиологических агентов, выявленных на поверхности модифицированных цементных защитных покрытий, включая их таксономическую принадлежность, морфологию и биологические особенности, после экспозиции в условиях микробиологического воздействия,

Материалы и методы. В процессе изготовления опытных образцов вяжущим веществом служила сухая цементная смесь марки «Ахтон», отобранная в соответствии с программой исследования как базовый компонент для получения композиционных материалов. Для модификации цементных защитных покрытий применяли антисептические добавки: «Санатекс. Универсал» (прозрачная слабоокрашенная жидкость, плотностью 1,0–1,01 г/см³, производитель – ООО «Тиккурила»), «Антиплесень. Лакра» (водный раствор сополимеров гексаметиленгуанидина, плотностью 1,0 г/см³, производитель – ООО «Лакра Синте»), «DALI. Универсальный антисептик» (бесцветная жидкость, плотностью 1,0 г/см³, производитель – ООО «НПП Рогнеда»).

Модификацию разработанных образцов выполняли 2 методами. В первом случае антисептические добавки вводились непосредственно в составы при их изготовлении в количествах 2,5 %, 5 % и 7,5 % от массы вяжущего материала с водой затворения. Водоцементное отношение в цементных композициях не изменялось и составляло 0,3. Во втором случае, поверхность образцов цементных защитных покрытий обрабатывалась 100 % раствором антисептических добавок, путём двукратного погружения. Контрольным составом являлись образцы цементных композитов без содержания в них и обработки поверхности биоцидным препаратом. В таблице 1 приведены разработанные составы.

Таблица 1

Составы для исследований

№ состава	Масса компонентов, %			Название добавки	Обработка поверхности образцов антисептиком
	Сухая штукатурка	Вода	Антисептическая добавка		
0	100	30	–	–	–
1		27,5	2,5	Санатекс. Универсал	–
2		25	5		–
3		22,5	7,5		–
4		30	–		+
5		27,5	2,5	Антиплесень. Лакра	–
6		25	5		–
7		22,5	7,5		–
8		30	–		+
9		27,5	2,5	DALI®. Универсальный антисептик	–
10		25	5		–
11		22,5	7,5		–
12		30	–		+

*Примечание: состав №0 принят за контрольный (бездобавочный).

Для осуществления испытания было разработано 39 цементных композитов (по 3 образца каждого состава) размером 1×1×3 см. Изготовленные модифицированные материалы после отверждения 28 суток в нормальных температурно-влажностях условиях, экспонировались 1 год в натуральных условиях на территории Республики

Мордовия, для которой характерен умеренно континентальный климат с холодной морозной зимой и умеренно жарким летом, в открытой траншее на глубине 50 см.

После выдерживания модифицированных цементных защитных покрытий в грунтовых условиях, образцы с соблюдением стерильности

доставлялись в специализированную лабораторию, где с поверхности разработанных материалов были взяты смывы и сделан посев в чашки Петри с питательными средами. Для бактериологического исследования микроорганизмов применялась питательная среда МПА (мясо-пептонный агар), для культивирования различных видов грибов среда Чапека-Докса.

Чашки Петри с МПА находились в термостате в течение 48 ч при температуре 37°C, после чего с выросших колоний проводилась окраска бактерий по Граму (Г.К. Грам, бактериолог, Дания, 1853–1938 гг.). Приготовленные препараты просматривались на биологическом микроскопе при увеличении – 1600×. Результаты окраски по Граму сообщают о принадлежности бактерий: грамположительные бактерии (с толстой клеточной стенкой) окрашиваются в сине-фиолетовый цвет, а грамотрицательные (с тонкой клеточной стенкой) – в ярко-малиновый или красный. С помощью справочника Берджи по бактериологической систематике была осуществлена идентификация бактерий по характерным для них фенотипическим признакам [19, 20].

Чашки Петри с питательной средой Чапека-Докса инкубировались в термостате в течение 8 дней при температуре 25 °C. Мицелий и спороношение микроскопических грибов изучали на предметном стекле, покрытом покровным стеклом с помощью биологического микроскопа при увеличении – 640×. Это даёт возможность провести видовую идентификацию выделенных видов микромицетов.

Для более детального понимания появления микробов-биодеструкторов на поверхностях разработанных цементных композитов дополнительно были изучены микроорганизмы воздушной (седиментационным методом) и грунтовой (методом отбора пробы грунта из траншеи) сред.

Проба грунта отбиралась в стерильную колбу с глубины траншеи 50 см, стерильной металлической ложкой. Колба с пробой грунта герметично запечатывалась скотчем и отправлялась в лабораторию, где осуществлялся посев пробы отобранного грунта на питательные среды МПА и Чапека-Докса в чашки Петри.

Седиментационный метод основан на способности микроорганизмов под действием силы тяжести и влиянием движения воздуха оседать вместе с частицами пыли на поверхность питательной среды. Для посева чашки Петри с питательными средами МПА и Чапека открывались непосредственно на площадке, где экспонировались образцы на 5 мин. По истечению времени чашки закрывались, подписывались и доставлялись в лабораторию для дальнейшего исследования.

Экспериментальные результаты и их анализ. Проведенное исследование дало возможность идентифицировать видовой состав микробиоты, колонизирующей цементные композиты в эксплуатационных условиях. Полученные данные (табл. 2) демонстрируют, как методы модификации материалов влияют на формирование микробных сообществ, что имеет существенное значение для разработки биостойких строительных композитов.

Согласно таблице 2, проведем детальный анализ видового разнообразия микроорганизмов, преимущественно колонизирующих модифицированные материалы в заданных условиях для выявления потенциально патогенных и биодеструктивных видов.

Из результатов видно, что образцы составов №1, №2, №3 («Санатекс. Универсал»), №5, №6, №7 («Антиплесень. Лакра»), №9, №10, №11 («DALI®. Универсальный антисептик») показали лучшие результаты, поскольку на материалах не были идентифицированы мицелиальные грибы, преобладали лишь представители 2 родов бактерий (грамположительные палочки *Bacillus* и грамотрицательные палочки *Pseudomonas*). Очевидно это связано с первым методом модификации материалов, так как именно в данные цементные композиты биоцидные препараты вводились непосредственно в составы при их изготовлении. Важно отметить, что микрофлора разработанных образцов не меняется с увеличением концентрации и вида антисептических добавок в составах.

Бактерии родов *Bacillus* и *Pseudomonas* присутствовали абсолютно на всех экспериментальных составах, как модифицированных, так и контрольном.

Грамположительные бактерии рода *Bacillus* широко распространены в природе, практически повсеместно. Их можно обнаружить в почве, воде, воздухе и даже в экстремальных условиях, таких как пустыня и Антарктида. Это свидетельствует о высоком уровне адаптации микроорганизмов к разнообразным экологическим нишам. Согласно справочнику Берджи по бактериологической систематике бактерии рода *Bacillus* относятся к группе грамположительных палочек и кокков, которые образуют эндоспоры. Они представляют собой при микроскопировании бактерии палочковидной формы, линейные размеры клеток варьируются в диапазоне 0,5–2,5 × 1,2–10 мкм. Отличительной чертой является специфическая конфигурация концов клеток – закруглённая или «обрубленная». Клетки преимущественно формируют диплоидные пары или линейные цепочки. Являются подвижными благодаря перитрихальным жгутикам. Одни виды бактерий данного рода считаются строгими

аэробами, а другие – факультативными анаэробами. Способность выживать в неблагоприятных условиях объясняется наличием покоящихся форм – спор. Грамположительные палочки

имеют достаточно большую активность ферментов, и могут привести к биодеструкции некоторые материалы [20].

Таблица 2

Микрофлора на образцах цементных композитов

№ состава	Бактерии		Микроскопические грибы	
	Роды бактерий	Общее количество родов бактерий	Виды грибов	Общее количество видов грибов / количество родов
0	<i>Escherichia, Bacillus, Flavobacterium, Micrococcus, Pseudomonas</i>	5	<i>Alternaria brassicae, Aureobasidium pullulans, Cladosporium elatum, Fusarium moniliforme, Mucor corticola, Penicillium nigricans</i>	6/6
1	<i>Bacillus, Pseudomonas</i>	2	–	–
2	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
3	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
4	<i>Bacillus, Flavobacterium, Pseudomonas, Micrococcus</i>	4	<i>Mucor corticola</i>	1/1
5	<i>Bacillus, Pseudomonas</i>	2	–	–
6	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
7	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
8	<i>Bacillus, Flavobacterium, Pseudomonas, Micrococcus</i>	4	<i>Aureobasidium pullulans, Mucor corticola</i>	2/2
9	<i>Bacillus, Pseudomonas</i>	2	–	–
10	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
11	<i>Bacillus, Pseudomonas,</i>	2	–	–
12	<i>Bacillus, Flavobacterium, Pseudomonas, Micrococcus</i>	4	<i>Alternaria brassicae, Aureobasidium pullulans, Mucor corticola, Penicillium nigricans</i>	4/4

Бактерии рода *Pseudomonas* встречаются в почве, морской и пресной воде, воздухе, это связано с их способностью ассимилировать широкий спектр органических соединений и адаптироваться к различным экологическим условиям. Имеют форму прямых или слегка изогнутых палочек, размеры которых варьируются от 0,5–1,0 × 1,5–5,0 мкм. Подвижность обеспечивается одним или несколькими полярными жгутиками, однако, существуют отдельные случаи, когда бактерии этого рода неподвижны. Метаболизм чисто дыхательного типа, при котором кислород служит кофактором акцептором электронов. Некоторые виды грамотрицательных бактерий рода *Pseudomonas* могут принимать участие в биоразрушении различных строительных материалов, включая цементные композиты [19].

Применение второго метода модификации (составы №4 – «Санатекс. Универсал», №8 – «Антиплесень. Лакра», №12 – «DALI®. Универсальный антисептик») цементных композитов привело к более интенсивному обрастанию поверхности материалов бактериями и микроскопическими грибами относительно первого, поскольку только поверхность образцов обрабатывалась

разными биоцидами, а в сами составы при их изготовлении препараты не вводились. В соответствии с бактериологическим анализом на поверхности цементных композиций составов №4, №8 и №12 заселились бактерии 4 родов: *Bacillus, Flavobacterium, Pseudomonas* и *Micrococcus*. Микологические исследования позволили выделить с составов: №4 – 1 вид мицелиальных грибов, относящегося к роду *Mucor*, №8 – 2 вида микромицетов (*Aureobasidium pullulans, Mucor corticola*) и №12 – 4 вида (*Alternaria brassicae, Aureobasidium pullulans, Mucor corticola, Penicillium nigricans*). Состав №4 является менее подверженным обрастаниям микроскопическими грибами в сравнении с цементными композитами составов №8 и №12.

Бактерии рода *Flavobacterium* представлены грамотрицательными палочками с параллельными боковыми сторонами и закруглёнными концами. Размер клеток, в большинстве случаев, составляет 0,5 × 1,0–3,0 мкм. Не содержат внутриклеточных гранул поли-β-гидроксибутирата, что отличает их от многих других родов бактерий и не образуют эндоспор. Оптимальная температура роста

составляет 37 °С. Представители рода *Flavobacterium* – каталазооксидазо- и фосфатазоположительные. Грамотрицательные палочки относятся к хемоорганотрофам, т.е. используют органические соединения для источника энергии и углерода. В средах с низкой концентрацией пептона микроорганизмы могут превращать углеводы в кислоту, без образования газа. Широко распространены в почве и в воде, обнаружены также пищевых продуктах [19].

Согласно определителю бактерий Бэрджи бактерии рода *Micrococcus* относятся к группе грамположительных кокков. Они представляют собой грамположительные клетки сферической формы, диаметром от 0,5 до 2,0 мкм, образуют чаще всего пары, тетрады или скопления неправильной формы, но не формируют цепочек. Растут при температуре 25–37 °С. Грамположительные микроорганизмы, преимущественно, неподвижны и неспорообразующие. Представители рода *Micrococcus* характеризуются как облигатные аэробы с дыхательным типом метаболизма. В процессе ферментации углеводов выработка кислоты минимальна или отсутствует. Отмечена способность данных микроорганизмов к росту на базовых (простых) питательных средах. Встречаются в почве, однако выделены в основном из воздуха [20].

Mucor corticola – вид плесневого гриба рода *Mucor* (белой плесени). Благоприятная температура роста микроорганизмов составляет от 20 до 30 °С. Конкретные показатели температуры могут зависеть от штамма и условий культивирования. Грибы рода *Mucor* в ходе своего метаболизма способны синтезировать и выделять во внешнюю среду незначительное количество органических кислот, в том числе яблочную, лимонную и щавелевую. Обладают способностью обитать в разнообразных экологических условиях. Они демонстрируют резистентность к воздействию агрессивных химических веществ и пониженных температур, что расширяет их адаптационный потенциал. В процессе поиска питательных субстратов мицелий грибов рода *Mucor* проявляет способность к инвазии строительных материалов – бетона, штукатурки и кирпича. Данное свойство потенциально обуславливает риск структурного ослабления и последующей деградации указанных материалов [10].

Микроскопический чёрный дрожжевой сапрофит вида *Aureobasidium pullulans* характеризуется температурным оптимумом метаболической активности 25 °С. В пределах умеренного климатического пояса данный вид грибов занимает лидирующие позиции по частоте встречаемости. Ареал распространения охватывает широкий спектр экологических

ниш: почва, водная среда, атмосферный воздух, на поверхностях известняковых пород, а также на листовых пластинах растений и во внутренних тканях растений. Грибы рода *Aureobasidium pullulans* продуцируют каталазу – фермент, обеспечивающий эффективное расщепление перекиси водорода до воды и кислорода. Помимо основной функции, каталаза этих грибов демонстрирует низкую активность в реакциях окисления спиртов и других соединений в присутствии перекисей [12].

Грибы вида *Alternaria brassicae* принадлежит к роду *Alternaria*. Хорошо развиваются при температуре 22–25 °С и высокой влажности воздуха выше 95 %. Разрастающиеся колонии таких грибов проникают вглубь материала и выделяют токсины, которые вызывают биохимическое разрушение конструкций. Плесневые грибы рода являются биодеструкторами и могут вызывать биоповреждения материалов и строительных конструкций [1].

Penicillium janczewskii (ранее *Penicillium nigricans*) является видом несовершенных грибов, относящихся к роду *Penicillium*. Повсеместно распространённый почвенный гриб. Микромицеты рода *Penicillium* могут оказывать значительное биодеструктивное воздействие на строительные материалы, приводя к ухудшению их физико-механических и эксплуатационных характеристик. В результате жизнедеятельности микроорганизмов, которые способны приспосабливаться к различным по своей природе материалам, наблюдаются следующие негативные изменения: снижения механической прочности материала, ухудшение адгезионных свойств (нарушение связей между отдельными компонентами композита), изменение структурных характеристик материала вследствие ферментативной активности и выделения метаболитов, нарушение целостности поверхностных и глубинных слоёв за счёт прорастания мицелия и образования биоплёнок. Данные грибы распространены повсеместно и легко адаптируются к различным условиям среды, особенно в помещениях с повышенной влажностью и плохой вентиляцией. Разрушающее действие грибов обусловлено агрессивным воздействием вторичных метаболитов: органических кислот (щавелевая, янтарная, яблочная, лимонная, молочная), окислительно-восстановительных и гидролитических ферментов, токсинов (пенициллин, патулин) на отдельные компоненты материалов. В материалах с высокой плотностью наблюдается в большинстве случаев локализация метаболитов в поверхностном слое,

тогда как в материалах с низкой плотностью отмечается равномерное распределение метаболитов по всему объему образца [15].

Наибольшее количество микроорганизмов приходится на бездобавочные образцы цементных защитных покрытий (состав №0), заселились бактерии 5 родов: *Escherichia*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* и 6 видов грибов: *Alternaria brassicae*, *Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium elatum*, *Fusarium moniliforme*, *Mucor corticola*, *Penicillium nigricans*. Только на образцах контрольного состава появились новые микроорганизмы относительно модифицированных композитов – это бактерии рода *Escherichia*, а также микромицеты видов *Cladosporium elatum* и *Fusarium moniliforme*.

Грамотрицательные бактерии рода *Escherichia* согласно определителю Берджи систематизированы в группу факультативно-анаэробных грамотрицательных палочек. Наблюдаемая интенсивная пролиферация при температуре 37 градусах °C свидетельствует о возможной патогенной природе выделенных культур. Представители данного рода демонстрируют высокую экологическую пластичность, успешно колонизируя водные среды, почвенные субстраты, а также разнообразные биотические и абиотические поверхности [12]. В работе [3] научно подтверждено, что бактерии рода *Escherichia* могут инициировать биоповреждение композитных материалов с минеральными вяжущими за счёт осуществления характерных биохимических процессов.

Микроскопические грибы вида *Cladosporium elatum* являются одним из видов рода *Cladosporium*, который входит в класс Дотидеомицеты. Представители рода *Cladosporium* обитают в воздухе, разлагающим органическом материале, помещениях. Плесневые грибы данного рода являются активными биодеструкторами и могут привести к биодеградации строительных материалы [7].

Грибы вида *Fusarium moniliforme* относятся к роду *Fusarium*. Распространены на всех континентах, но особенно хорошо развивается в районах с повышенной влажностью. Представители рода *Fusarium*, способны колонизировать различные субстраты и вызывать повреждение строительных материалов [2].

Анализируя данные таблицы 2, явно, что первый способ модификации материалов преобладает по сравнению со вторым, вне зависимости от биоцида и его концентрации его материалах. Второй способ также эффективен, если сравнить результаты составов №4, №8 и №12 с контрольным №0. Видовое разнообразие микроорганизмов бездобавочных значительно превышает показатели образцов составов №4, №8 и №12.

Кроме всего, были проведены микробиологические исследования пробы грунта, где непосредственно выдерживались образцы мелкозернистых бетонов, и воздуха над образцами в траншее (табл. 3).

Таблица 3

Микрофлора пробы суглинистого грунта и микробная обсеменённость воздуха в траншее (суглинистый грунт)

Бактерии	Общее количество родов бактерий	Микроскопические грибы	Общее количество видов грибов / количество родов
Проба грунта			
<i>Alcaligenes</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Thiobacillus</i>	7	<i>Alternaria alternate</i> , <i>Alternaria brassicae</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Aspergillus ustus</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Cladosporium elatum</i> , <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>Mucor corticola</i> , <i>Penicillium nigricans</i> , <i>Penicillium chrisogenum</i>	10/8
Проба воздуха			
<i>Escherichia</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Pseudomonas</i>	5	<i>Alternaria brassicae</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Aspergillus ustus</i> , <i>Chaetomium globosum</i> , <i>Cladosporium elatum</i> , <i>Fusarium moniliforme</i> , <i>Mucor corticola</i> , <i>Penicillium nigricans</i> , <i>Penicillium chrisogenum</i>	9/8

Согласно данным таблиц 2 и 3, видно, что микробиологический анализ показал наличие в

пробе грунта новых микроорганизмов: бактерий рода *Thiobacillus* и микроскопических грибов 4

видов (*Alternaria alternate*, *Aspergillus ustus*, *Chaetomium globosum*, *Penicillium chrysogenum*) относительно результатов цементных композитов.

Грамотрицательные небольшие палочковидные бактерии рода *Thiobacillus* принадлежат к группе аэробных хемолитотрофных микроорганизмов. В бактериологической систематике они включены в подгруппу бесцветных сероокисляющих бактерий, формируя отдельную секцию, дифференцированную по морфологическим критериям окислительной активности. Они проявляют выраженную способность к биодegradации цементных композитов посредством биохимического окисления серосодержащих соединений, сопровождающегося синтезом серной кислоты – ключевого агента коррозионного повреждения материала [20].

Несовершенные грибы вида *Aspergillus ustus* относятся к роду *Aspergillus* отделу Аскомикота. Часто встречаются в помещениях, почве с различными растительными субстратами умеренных регионов. Микромицеты данного вида способны расти при температуре +5 °С. Грибы рода *Aspergillus* продуцирующие небольшое количество кислот (устиновая) и ряд других метаболитов: автоцистины (и версиколорины), ауспалиды, стеригматоцистиноподобное химическое вещество и нидулол. Влияние *Aspergillus ustus* на разрушение строительных материалов может быть индивидуальным и зависит от условий и характеристик конкретных материалов [1].

Сапрофитный гриб вида *Chaetomium globosum* относится к семейству *Chaetomiaceae*, в основном обитает на растениях, почве, соломе, навозе, но также можно обнаружить в помещениях, на поверхностях конструкций, содержащих целлюлозу. Обладает целлюлолитической активностью, продуцирует микотоксины (хетоглобины А и С, четомин) [13].

Плесневый гриб *Penicillium chrysogenum* – потенциальный биодеструктор строительных материалов. Выделяют в среду относительно большое количество органических кислот, а также антибиотиков и микотоксинов. Находящиеся в воздухе бесполое споры *Penicillium chrysogenum* являются важными аллергенами для человека. Распространен в умеренном и субтропическом климате, встречается в почве, на гниющей растительности, внутри помещений, особенно во влажных или поврежденных водой зданиях [17].

Микроорганизмы воздушной среды также преобладают в количественном отношении по сравнению с потенциальными биодеструкторами разработанных цементных защитных покрытий. В воздушной среде, по сравнению с микромице-

тами идентифицированных с поверхности цементных композитов, было выявлено 3 новых вида грибов: *Aspergillus ustus*, *Chaetomium globosum*, *Penicillium chrysogenum*.

Очевидно, что огромное влияние на появление и дальнейшее развитие микроскопических грибов на модифицированных образцах оказывает эксплуатационная среда. Поскольку многие виды микроорганизмов живут в данной среде и при попадании их на материалы начинают развиваться, выбирая при этом менее биостойкие материалы. Цементные композиты подвергались воздействию атмосферных осадков, ультрафиолетового облучения, сезонным перепадам температуры.

Выводы. Согласно результатам микробиологического анализа с поверхности модифицированных цементных защитных покрытий, экспонированных в грунтовых условиях, было выделено 5 родов бактерий: *Escherichia*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* и 6 родов микроскопических грибов: *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*.

Из пробы грунта траншее, где выдерживались материалы, идентифицировано 7 родов бактерий: *Alcaligenes*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Thiobacillus* и 8 родов микромицетов: *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*.

Бактериологический анализ воздуха выявил 5 родов бактерий: *Escherichia*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, микологический 8 родов микроскопических грибов: *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*.

В процессе исследования была изучена биологическая стойкость модифицированных цементных защитных покрытий. Наиболее лучшими биоцидными показателями обладают цементные композиты (№1, №2, №3 «Санатекс. Универсал», №5, №6, №7 «Антиплесень. Лакра» и №9, №10, №11 «DALI Универсальный антисептик») полученные при первом способе модификации образцов, где антисептические добавки вводились непосредственно в составы при их изготовлении. Второй способ поверхностной обработки образцов разными антисептическими добавками менее устойчив к воздействию бактерий и микроскопических грибов (составы №4, №8, №12), исходя из результатов микробиологического исследования цементных композитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 196 с.
2. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Дергунова А.В., Сураева Е.Н., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Капушин С.Н. Биологическая и климатическая стойкость цементных композитов // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 3. С. 119–126.
3. Cwalina B. Biodeterioration of Concrete. Architecture Civil Engineering Environment, 2008. No. 1, Pp. 133–140.
4. Javaherdashti R. Microbiologically Influenced Corrosion an Engineering Insight. London: Springer-Verlag. 2008. 164 p.
5. Ледяйкин Н.В. Микроорганизмы на поверхности конструкций в животноводческих зданиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-8-16
6. Alum A. Cement-based biocide coatings for controlling algal growth in water distribution canals // Cement & Concrete Composites. 2008. Vol. 30(9). P. 839–847.
7. Ерофеева И.В. Исследование грибоустойчивости и фунгицидности цементных композитов в среде мицелиальных грибов // Русский инженер. 2018. № 2 (59). С. 44–47. DOI: 10.12737/article_5b115a615b7740.81075577
8. Elchishcheva T.F., Lediaikina O.V., Lediaikin N.V., Rodin A.I. Species Composition of Microorganisms in the Air Above the Samples of Cement Composites // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2612. No. 1. Pp. 40013–40013. DOI:10.1063/5.0113758
9. Jwerson W.P. Mechanism of microbial corrosion. Biodeterioration of Materials. Univ. of Aston in Birmingham. 1978. 28 p.
10. Ледяйкина О.В., Родин А.И., Власов Д.Ю. Видовой состав микроорганизмов, выявленных на образцах цементных композитов, экспонированных в условиях воздействия ультрафиолетового облучения и циклически действующих температурно-влажностных факторов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ». 2020. № 3 (33). С. 16–22. DOI: 10.35108/isvp20203(33)16-22
11. Теплякова Н.А., Омельченко Е.В. Вредное воздействие плесени и плесневых грибов на человека // Молодой ученый. 2016. №18-1 (122.1). С. 23–25.
12. Ледяйкина О. В., Родин А. И., Власов Д. Ю. Исследование видового состава биодеструкторов цементных композитов, выявленных на образцах, выдержанных в условиях циклического воздействия температурно-влажностных сред // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. №1 (17). С. 7–18. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.7
13. Ramesh Babu B., Maruthamuthu S., Rajasekar A., Muthukumar N., Palaniswamy N. Microbiologically influenced corrosion in dairy effluent. Spring. 2006. Vol. 3. № 2. Pp. 159–166.
14. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
15. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Калашников В.И., Ерофеева И.В., Смирнов В.Ф. Биостойкость декоративных цементных композитов // Вестник Приволжского территориального отделения РААСН. 2016. № 19. С. 304–308.
16. Ерофеев В.Т., Богатова С.Н., Богатов А.Н. Исследование биостойкости строительных материалов, модифицированных биоцидными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 48–53. DOI: 10.33622/0869-7019
17. Дергунова А.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Завалишин Е.В. Повышение биостойкости строительных материалов и изделий посредством пропитки их пористой структуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строит. ун-та. 2010 № 2(14). С. 218–222.
18. Videla H.A., Herrera L.K.; Microbiologically influenced corrosion: looking to the future // International Microbiology. Vol. 8. No. 3. 2005. Pp. 169–180.
19. Хоулт Дж., Криг Н., Снит П., Стейли Дж., Уильямс С. Определитель бактерий Берджи. Том 1. Пер. с англ. под ред. акад. РАН Г.А. Заварзина. М.: Мир. 1997. 429 с.
20. Хоулт Дж., Криг Н., Снит П., Стейли Дж., Уильямс С. Определитель бактерий Берджи. Том 2. Пер. с англ. под ред. акад. РАН Г.А. Заварзина. М.: Мир. 1997. 368 с.

Информация об авторах

Ледяйкин Никита Васильевич, аспирант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Институт Архитектуры и Строительства. Россия, 430000, Саранск, ул. Советская, д. 24.

Поступила 08.12.2025 г.

Ledyaykin N.V.*National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev,**E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru*

STUDY OF THE FOULING OF MODIFIED CEMENT COMPOSITES BY BIODEGRADING MICROORGANISMS UNDER EXPOSURE TO SOIL CONDITIONS

Abstract. *Biological corrosion is a key factor significantly reducing the reliability and durability of building materials, products, and structures. Experiments have confirmed that to increase the resistance of materials to biodegradation, two complementary technological solutions are recommended: the incorporation of biologically active substances into the material during production and post-production surface treatment with biopreparations that form a protective barrier against microbiological attack. The subject of this scientific study is a composite material based on a dry cement plaster mix integrated with specialized antiseptic agents («Sanatex. Universal», «Anti-Mold. Lakra», and «DALI® Universal Antiseptic»), providing protection against biodegradation. The study aims to establish the taxonomic profile of microbial communities forming on the surface of cement composites with various antiseptic additives and to conduct a comparative analysis of the biocidal activity of the modifying components studied. Modification of the developed material compositions was carried out using two methods: direct addition of a biocidal preparation to the dry mix and water during manufacturing, and impregnation of hardened, additive-free samples with antiseptic additives. The studied cement composites were aged for one year in soil conditions. Microbiological studies identified the species composition of potential biodegraders prevalent on the material surfaces. The microbiological effectiveness of the antiseptic additives used was determined. It was found that, for both methods of producing protective cement coating samples, the best results were achieved with the biocidal preparation «Sanatex. Universal» which demonstrated the lowest number of microorganisms colonizing and developing on the developed materials.*

Keywords: *cement composites, antiseptic additives, bacteria, mold fungi, biostability.*

REFERENCES

1. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biological resistance of materials [Biologicheskoye soprotivleniye materialov]. Saransk: Mordovian University Press, 2001. 196 p. (rus)
2. Erofeev V.T., Rodin A.I., Dergunova A.V., Suraeva E.N., Smirnov V.F., Bogatov A.D., Kaznacheev S.V., Kapushin S.N. Biological and climatic resistance of cement composites [Biologicheskaya i klimaticheskaya stoykost tsementnykh kompozitov]. Academia. Architecture and construction. 2016. No. 3. Pp. 119–126. (rus)
3. Cwalina B. Biodeterioration of Concrete. Architecture Civil Engineering Environment. 2008. No. 1, Pp. 133–140.
4. Javaherdashti R. Microbiologically Influenced Corrosion an Engineering Insight. R. Javaherdashti. London: Springer-Verlag. 2008. 164 p.
5. Ledyaykin N.V. Microorganisms on the surface of structures in livestock buildings [Mikroorganizmi na poverkhnosti konstruksii v zhivotnovodcheskikh zdaniyakh]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025 No. 3 Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-8-16. (rus)
6. Alum A. Cement-based biocide coatings for controlling algal growth in water distribution canals. Cement & Concrete Composites. 2008. Vol. 30(9). P. 839–847.
7. Erofeeva I.V. Investigation of fungal resistance and fungicidal properties of cement composites in the environment of mycelial fungi [Issledovaniye gribostoykosti i fungitsidnosti tsementnykh kompozitov v srede mitselialnykh gribov]. Russian Engineer. 2018. Vol. 59. No. 2. Pp. 44–47. DOI: 10.12737/article_5b115a615b7740.81075577. (rus)
8. Elchishcheva T.F., Lediaikina O.V., Lediaikin N.V., Rodin A.I. Species Composition of Microorganisms in the Air Above the Samples of Cement Composites. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2612. No. 1. Pp. 40013–40013. DOI: 10.1063/5.0113758
9. Jwerson W.P. Mechanism of microbial corrosion. Biodeterioration of Materials. Univ. of Aston in Birmingham. 1978. 28 p.
10. Ledyaykin N.V., Ledyaykina O.V., Zotkina M.M. Microbiological study of plaster composites under conditions of high humidity and constant temperature [Mikrobiologicheskoye issledovaniye shtukaturnykh kompozitov v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti i postoyannoy temperatury]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region: scientific and technical journal. Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering. Astrakhan: GAOUAOVO «AGASU», 2022. Vol. 42. No. 4. Pp. 39–46. DOI: 10.35108/isvp20203(33)16-22. (rus)

11. Teplyakova N.A., Omelchenko E.V. Harmful effects of mold and mold fungi on humans [Vrednoye vozdeystviye pleseni i plesnevykh gribov na cheloveka]. Young scientist. 2016. Vol. (122.1). No. 18-1. Pp. 23–25. (rus)

12. Ledyaykina O.V., Rodin A.I., Vlasov D.Yu. Study of the species composition of biodestructors of cement composites identified in samples maintained under cyclic exposure to temperature and humidity environments [Issledovanie vidovogo sostava biodestruktorov tsementnykh kompozitov, vliyavleniy na obraztsakh, viderzhannikh v usloviyakh tsiklicheskogo vozdeystviya temperaturno-vlazhnostnykh sred]. Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Materials. Designs. Technologies. 2021. No. 1 (17). Pp. 7–18. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.1.7. (rus)

13. Ramesh Babu B., Maruthamuthu S., Rajasekar A., Muthukumar N., Palaniswamy N. Microbiologically influenced corrosion in dairy effluent. Spring. 2006. Vol. 3. № 2. Pp. 159–166.

14. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures [O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy]. Academia. Architecture and construction. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (rus)

15. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kalashnikov V.I., Erofeeva I.V., Smirnov V.F. Biostability of decorative cement composites [Biostoykost dekorativnykh

tsementnykh kompozitov]. Bulletin of the Volga territorial branch of the RAASN. 2016. No. 19. Pp. 304–308. (rus)

16. Erofeev V.T., Bogatova S.N., Bogatov A.N. Study of the biostability of building materials modified with biocidal additives [Issledovaniye biostoykosti stroitelnykh materialov. modifitsirovannykh biotsidnymi dobavkami]. Industrial and civil construction. 2018. No. 8. Pp. 48–53. DOI: 10.33622/0869-7019. (rus)

17. Dergunova A.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Zavalishin E.V. Increasing the biostability of building materials and products by impregnating their porous structure [Povysheniye biostoykosti stroitelnykh materialov i izdeliy posredstvom propitki ikh poristoy struktury]. News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2010. Vol. 14. No. 2. Pp. 218–222. (rus)

18. Videla H.A., Herrera L.K.; Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. International Microbiology. Vol. 8. No. 3. 2005. Pp. 169–180.

19. Hoult J., Krieg N., Smith P., Staley J., Williams S. Burgee's Bacteria Determinant [Opredelitel bakteriy Berdzhii]. Vol. 1. M.: World. 1997. 429 p. (rus)

20. Hoult J., Krieg N., Smith P., Staley J., Williams S. Burgee's Bacteria Determinant [Opredelitel bakteriy Berdzhii]. Vol. 2. M.: World. 1997. 368 p. (rus)

Received 08.12.2025

Для цитирования:

Ледяйкин Н.В. Исследование обрастаемости модифицированных цементных композитов микроорганизмами-биодеструкторами при экспозиции в грунтовых условиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-8-18

For citation:

Ledyaykin N.V. Study of the fouling of modified cement composites by biodegrading microorganisms under exposure to soil conditions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-8-18

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31

Василькин А.А., Зубков Г.В.Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет***E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА ГАЙКИ ДЛЯ НАТЯЖЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БОЛТОВ

Аннотация. Сдвигоустойчивое соединение на высокопрочных болтах и болтокомплектах является соединением с контролируемым натяжением, поскольку надежное обеспечение заданного усилия натяжения необходимо для того, чтобы гарантировать проектную работу соединения. Известно несколько способов контроля усилия натяжения болтов, однако в настоящее время регламентирован и используется на практике только один – по моменту закручивания. Использование иных методов контроля предварительного натяжения болтов может добиться повышения надежности соединений, в которых применяются болты с контролируемым натяжением, и отменить необходимость тарировки динамометрических ключей, проведения испытаний по определению коэффициента закручивания. В статье представлено экспериментальное определение угла закручивания для обеспечения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов диаметров М16, М20 и М24, класса прочности 10.9 в лабораторных условиях. Разработана экспериментальная установка, с помощью которой проведено исследование контролируемого натяжения болтов. Определена зависимость между углом поворота гайки, моментом закручивания и усилием натяжения болта. Проведена обработка полученных результатов.

Ключевые слова: *фрикционное соединение, сдвигоустойчивое соединение, контроль усилия натяжения болта, высокопрочный болт, угол поворота болта*

Введение. При исследовании действительной работы строительных конструкций уделяется большое внимание уточнению работы соединений и стыков элементов строительных конструкций [1–5], а также разработке новых способов соединений [6, 7].

Среди отечественных работ, посвященных соединениям стальных конструкций [8, 9], имеются исследования по соединению тонкостенных элементов [10, 11], изучению работы соединений с использованием как обычных [12–14], так и высокопрочных болтов [15–19]. Известны исследования работы фрикционных соединений, выполненные в НИЦ Строительство, под руководством Ивана Ивановича Ведякова, [20–22] и НИУ МГСУ по экспериментальному исследованию работы болтовых соединений [23–25].

Зарубежные ученые также проводят многочисленные экспериментальные исследования различных аспектов работы фрикционных соединений: влияние способа обработки соединяемых поверхностей, релаксация предварительного натяжения болта, соединение нержавеющей сталей [26–29].

Как известно, достижение высокопрочными болтами в соединении заданного усилия натяжения необходимо для обеспечения его проектной несущей способности [22, 24]. В нормативной документации, применяемой в России, регламентированы два способа обеспечения проектного усилия натяжения болтов – затяжкой до расчетного момента закручивания и поворотом гаек на заданный угол [30].

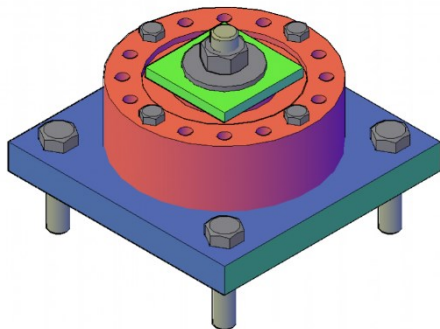
Метод контроля усилия натяжения по моменту закручивания зарекомендовал себя как надежный метод и повсеместно используется на практике, однако требует наличия мощных и дорогостоящих динамометрических ключей и проведение их ежедневной тарировки перед выполнением работ на строительной площадке.

Работы, посвященные исследованию метода контроля усилия натяжения по углу поворота гайки, существуют в значительно меньшем объеме, а в нормативной документации [30] отсутствуют указания по его использованию для большей части ряда диаметров болтов, за исключением болтов М24 класса прочности 10.9. Данный метод позволяет надежно обеспечить достижение в процессе натяжения болтов проектного усилия, исключает влияние на это усилие коэффициента закручивания, дает возможность исключить из технологического процесса монтажа процедуры тарировки динамометрических ключей и экспериментального определения среднего значения коэффициента закручивания каждой партии болтов.

Целью настоящего исследования является экспериментальное определение угла поворота высокопрочных болтов класса прочности 10.9 диаметров М24, М20, М16 для обеспечения расчетного усилия натяжения болта. Определение и анализ зависимости между углом поворота гайки, моментом закручивания и усилием в теле болта позволит расширить область применения метода контроля натяжения болтов по углу поворота гайки.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ. В процессе проведения эксперимента выполнялось натяжение 15 болтов M24, M20, M16 (по 5 образцов каждого диаметра) класса прочности 10.9 по ГОСТ Р 52644-2006 длиной 150 мм. Толщина пакета, образованного испытательной установкой, составила 110 мм (между шайбами) для всех диаметров болтов, что составляет для M24 – 4,8d, M20 – 5,5d, M16 – 6,8d. Для определения усилия натяжения болта использовался тензодатчик Load Cell DYLF 102 50T, измеряющий усилие в диапазоне от 0 до 500 кН, с относительной погрешностью при измерении 0,05 %.

Экспериментальная установка для натяжения болтов представлена на рисунке 1. Она состоит из опорной пластины размером 260×260 мм, толщиной 30 мм, выполненной из стали



С345, которая прикреплена к массивному неподвижному основанию (силовой раме) четырьмя болтами M20 класса прочности 10.9 через стальные прокладки, обеспечивающие необходимый зазор для размещения головки болта. Для проведения эксперимента изготовлено 3 пластины, отличающихся диаметром посадочного отверстия, для испытания болтов трех различных диаметров.

Для измерения угла поворота ключа на силовую раму устанавливался циферблат (транспортир). К опорной пластине с помощью двух болтов M12 прикреплён предварительно откалиброванный тензодатчик. На верхнюю плоскость датчика нагрузки установлена распределительная квадратная шайба размером толщиной 10 мм из стали С245.

При разработке установки была предварительно разработана 3-D модель для проверки возможности монтажа на силовой раме (см. рис. 1).

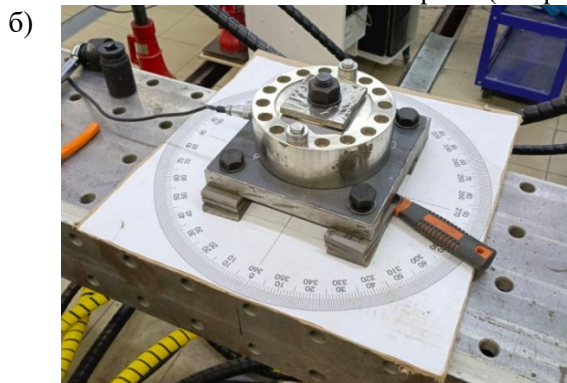


Рис. 1. Экспериментальная установка:
а – 3-D модель; б – установка в сборе

Установка была разработана таким образом, чтобы обеспечить надёжную фиксацию элементов, исключить вращение болта в начальной фазе испытания (головка болта фиксировалась от перемещения ключом), а также обеспечить точную передачу нагрузки через опорную пластину. Особое внимание было уделено центровке элементов, учёту геометрии головки болта и установке измерительной аппаратуры.

Подготовка к процедуре натяжения болтов проводилась в соответствии с указаниями СП 70.13330.2012 [30]. Болты, гайки и шайбы были расконсервированы и выдержаны в смеси из 70–75 % неэтилированного бензина и 30–25 % минерального масла по ГОСТ Р 51634.

Для натяжения болта и определения угла закручивания использовалось два динамометрических ключа. Для диапазона начальных моментов 60–360 Н·м применялся динамометрический ключ USAG с длиной рукоятки 0,5 м. Второй ключ

NORGAU, с длиной рукоятки 2 м и максимальным моментом закручивания 2000 Н·м, использовался для натяжения болта на момент более 400 Н·м (рис. 2). Перед проведением эксперимента ключи тарировались в соответствии с требованиями ГОСТ 33530-2015 «Ключи моментные. Общие технические условия».

Для определения угла закручивания на ключ закреплялся лазерный дальномер и направлялся на бумажный транспортир; угол отмечался до начала затяжки и фиксировался после щелчка динамометрического ключа о достижении заданного момента, что снижало погрешности визуальной оценки (см. рис. 3). Усилие, возникающее в болте, регистрировалось тензодатчиком Load Cell DYLF 102 50T и передавалось на универсальный цифровой индикатор ТС-32К с отображением на экране, что обеспечивало возможность непрерывной записи усилия натяжения (см. рис. 4).

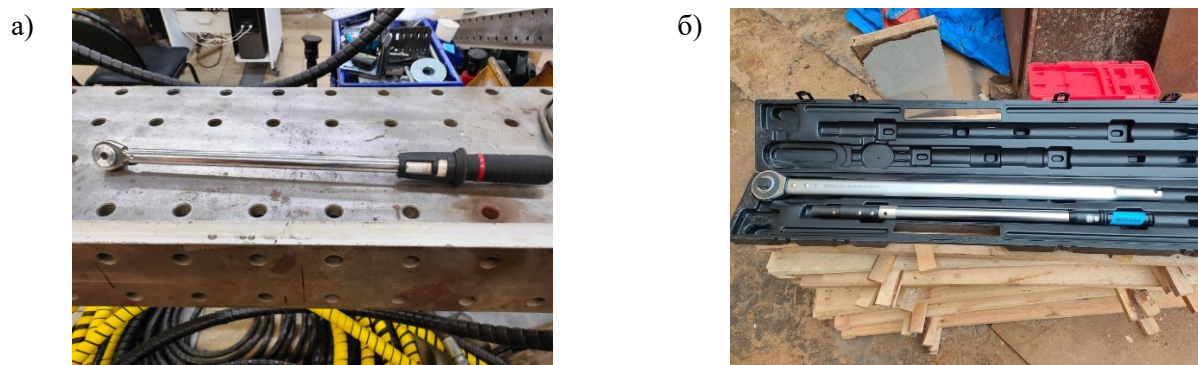


Рис. 2. Использование динамометрических ключей:
а – ключ USAG для моментов 40–360 Н·м; б – ключ NORGAW 400–2000 Н·м



Рис. 3. Снятие показаний угла поворота ключа



Рис. 4. Цифровой индикатор TC-32K

Дальнейшее натяжение болта происходило в следующем порядке:

1. Закручивание гайки вручную, без использования инструментов с максимально возможным усилием.

2. На динамометрическом ключе выставлялось значение момента закручивания, в дальнейшем момент увеличивался с определенным шагом.

3. Фиксирование начального значения угла между рукояткой ключа и нулевым делением на специально изготовленном циферблате. На первом шаге натяжения начальное значение угла фиксировалось при возрастании усилия в болте со стартового значения в 60–100 кг.

4. Осуществлялось натяжение болта на выставленный момент закручивания до щелчка. Поворот ключа проводился плавно, без рывков.

5. После щелчка ключа о достижении установленного момента фиксировался конечный угол закручивания. Конечный угол фиксировался при положении ключа «в натяг», при воздействии на рукоятку ключа силы, соответствующей необходимому моменту закручивания.

6. Снятие показаний с индикатора TC-32K о достигнутом усилии натяжения болта (рис. 5).

Для определения угла закручивания на ключ закреплялся лазерный дальномер и направлялся на бумажный транспортир; угол отмечался до начала затяжки и фиксировался после щелчка динамометрического ключа о достижении заданного момента, что снижало погрешности визуальной оценки (см. рис. 3). Усилие, возникающее в болте, регистрировалось тензодатчиком Load Cell DYLF 102 50T и передавалось на универ-

сальный цифровой индикатор ТС-32К с отображением на экране, что обеспечивало возможность непрерывной записи усилия натяжения (см. рис. 4).

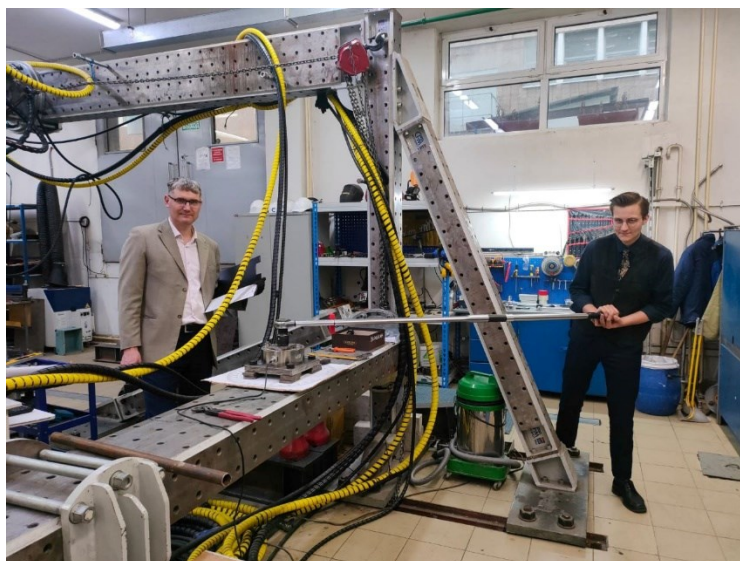


Рис. 5. Процедура натяжения высокопрочного болта

Таким образом, процесс натяжения болта был разбит на шаги, на каждом из которых фиксировались крутящий момент, приложенный к гайке, угол ее поворота относительно начального положения и усилие в болте. Шаг увеличения крутящего момента был выбран таким образом, чтобы расчетный момент, определенный согласно указаниям СП 70.13330.2012 при коэффициенте закручивания, равном 0,17, достигался за 10 шагов. Расчетные усилия для болтов определялись в соответствии с указаниями СП 16.13330.2017.

Расчетное усилие натяжения для болтов М24 класса прочности 10.9 составляет 257,0 кН, для болтов М20 – 178,4 кН, для болтов М16 – 114,3 кН. Расчетный момент закручивания для болтов М24 составляет 1048,5 Н·м, для болтов М20 – 606,4 Н·м, для болтов М16 – 310,8 Н·м.

Основная часть. Таблица 1 отображает снятие результатов эксперимента для образца диаметром М24. Момент закручивания болта меняется вручную с шагом в 100 Н·м, каждому значению момента закручивания соответствует угол поворота ключа до достижения установленного момента. В применяемых моделях динамометрических ключей момент закручивания устанавливается на рукоятке ключа, достижение момента сигнализируется громким щелчком. После достижения искомого (установленного на ключе) момента брался отсчет по прибору ТС-32К и определялось усилие натяжения болта. При данном методе исследования было превышено расчетное усилие натяжения болта Р. Так, для болта М24 значение Р составляет 257 кН = 26214 кг. Из

табл. 1 видно, что при М=1500, усилие натяжения составило 23500 кг, при следующем моменте равном 1600 Н·м, уже 28000 кг.

После выполнения первого цикла эксперимента с болтами М24 и анализа полученных результатов было обращено внимание на данную проблему. Поэтому на следующих этапах эксперимента при работе с болтами М20 и М16 порядок натяжения болта был изменен.

Таблица 1

Результаты эксперимента болт №2 М24х150

Момент	Усилие	Угол закручивания ключа, градусов
200	3658	0
300	5212	10
400	7100	22
500	8800	30,5
600	10880	39
700	12540	48
800	14500	58
900	16500	67,5
1000	18800	78,5
1100	19200	81,5
1200	22500	96
1300	22700	98,5
1400	23150	103,5
1500	23500	104,5
1600	28000	143,5

На подготовительном этапе эксперимента было принято значение коэффициента закручивания равным 0,17, вычислен момент закручивания и соответственно имелся ориентир по теоре-

тическому моменту закручивания, чтобы не превысить расчетное усилие натяжения и соответствующий искомый угол закручивания. Далее, при закручивании болта внимание акцентировалось на показаниях прибора цифрового индикатора ТС-32К. При приближении показаний прибора к значению расчетного усилия натяжения болта один исследователь закручивал болт ключом, второй снимал показания на цифровом индикаторе, третий человек следил за отсчетом угла на транспортире. При достижении на индикаторе значения расчетного усилия натяжения подавался сигнал и в этот момент снимались показания по углу поворота на транспортире. Из-за того, что физически тяжело затягивать болт М20 и тем более М24, один человек не мог плавно закручивать болт и отслеживать угол в момент сигнала.

На графике, представленном на рис. 3 и в таблице 1, можно увидеть, что у образца № 2 в диапазоне момента закручивания 1200–1300 Н·м изменение усилия натяжения произошло всего на 200 кг при изменении угла поворота на $2,5^\circ$. Было предположено, что в данный момент происходила пластическая деформация болта, когда момент существенно увеличился, а усилие натяжения мало возросло. Однако, в таком случае был бы логичен значительный угол поворота ключа (как это бывает при пластической деформации или срыве резьбы, когда ключ поворачивается на большой угол, а усилие натяжения в болте не возрастает), чего не происходило. Получается, что нужно приложить значительную силу (значительный момент), чтобы хоть немного затянуть

болт (что показывает небольшой угол). Возможно, это объясняется тем, что в данном месте болта имеется дефект резьбы болта, который тяжело «пройти» гайке. По-видимому, на практике может сложиться ситуация, когда болт с подобным дефектом будет закручен на расчетный момент, который определит проектировщик, однако из-за проблем с резьбой не будет достигнуто необходимое усилие натяжения болта. Данное наблюдение важно для понимания особенностей процесса натяжения болта и было выявлено в результате анализа полученных данных натурного эксперимента. Данный эффект проявился в одном из пяти исследуемых болтов (что составило 20 %), то есть в реальном узле тяжелой стальной конструкции с сотней болтов, количество потенциальных болтов, не имеющих требуемого усилия натяжения и соответственно не обладающих запроектированной несущей способностью, будет достаточно много. Указанное размышление подтверждает работа группы болтов М16 (графики на рис. 5), где также имеется один образец с подобным НДС (образец № 2) в процессе закручивания.

Обращает на себя внимание, что график зависимости угол поворота – усилие натяжения, представленные на рис. 6–8 не имеет резких изломов и указывает, что при контроле усилия натяжения болта по углу поворота на него не влияет состояние резьбы и коэффициент закручивания.

Зависимости усилия натяжения в болтах от момента закручивания показаны на рисунках 3–5, зависимости усилия в болтах от угла поворота гайки показаны на рисунках 6–8.

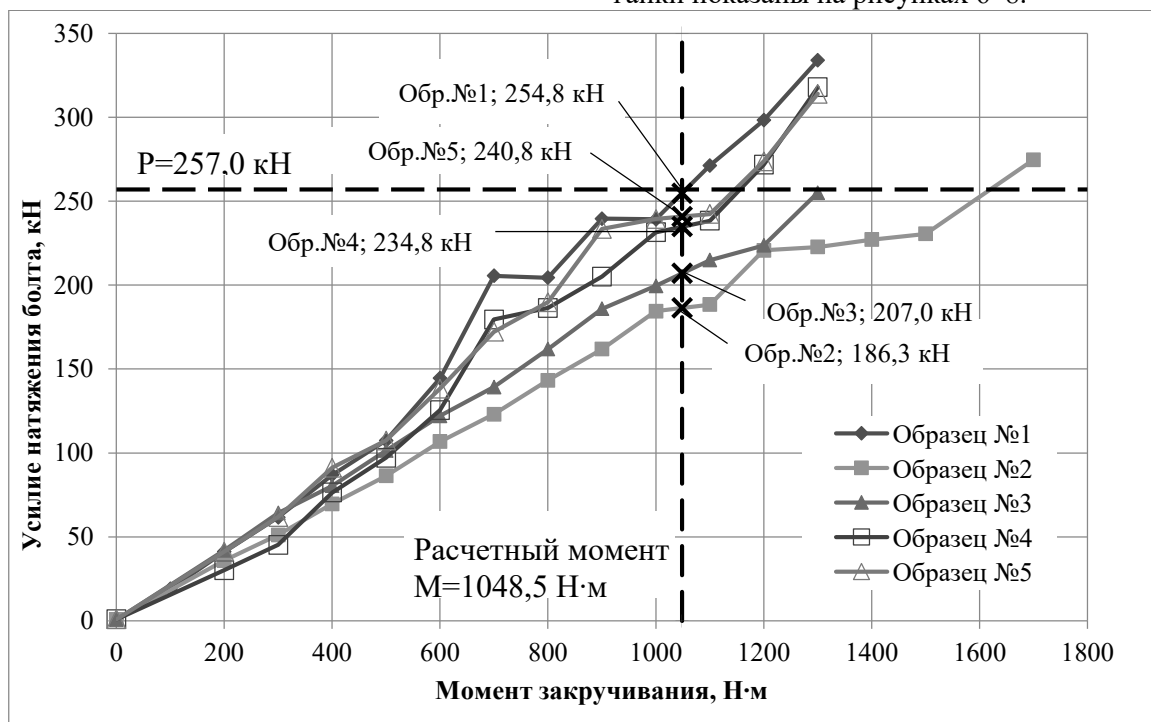


Рис. 3. Зависимость усилия от крутящего момента, М24, 10.9

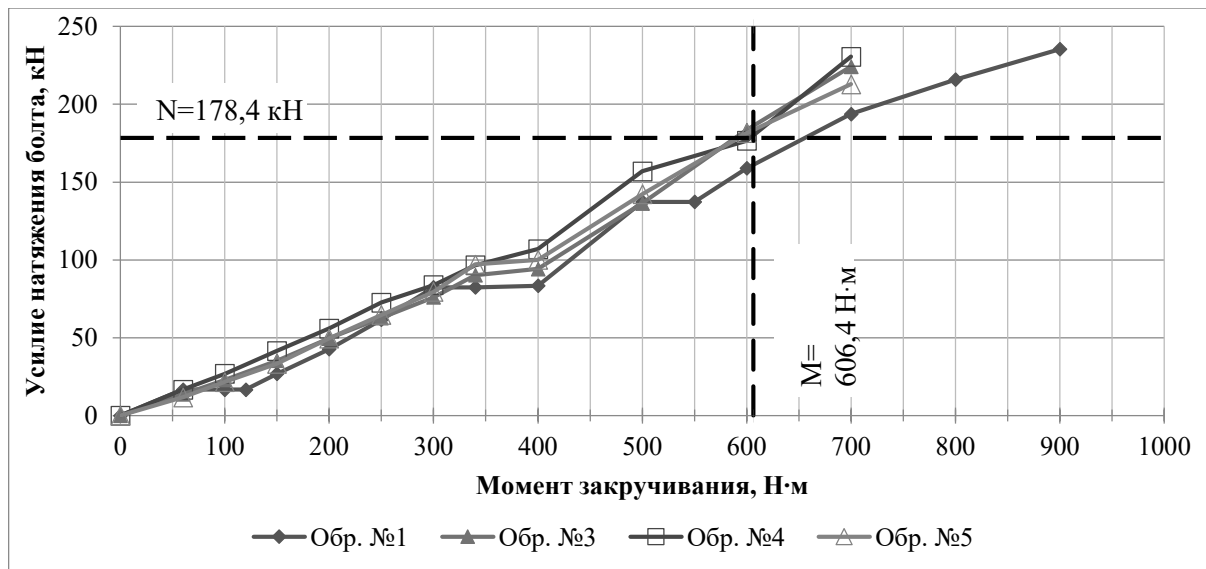


Рис. 4. Зависимость усилия от крутящего момента, M20, 10.9

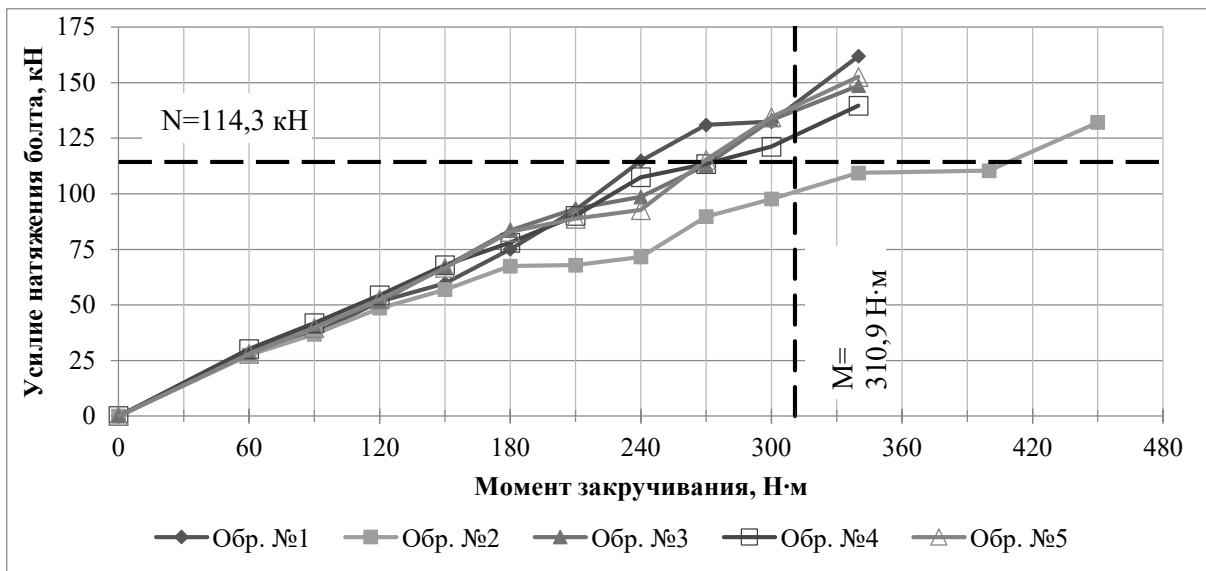


Рис. 5. Зависимость усилия от крутящего момента, M16, 10.9

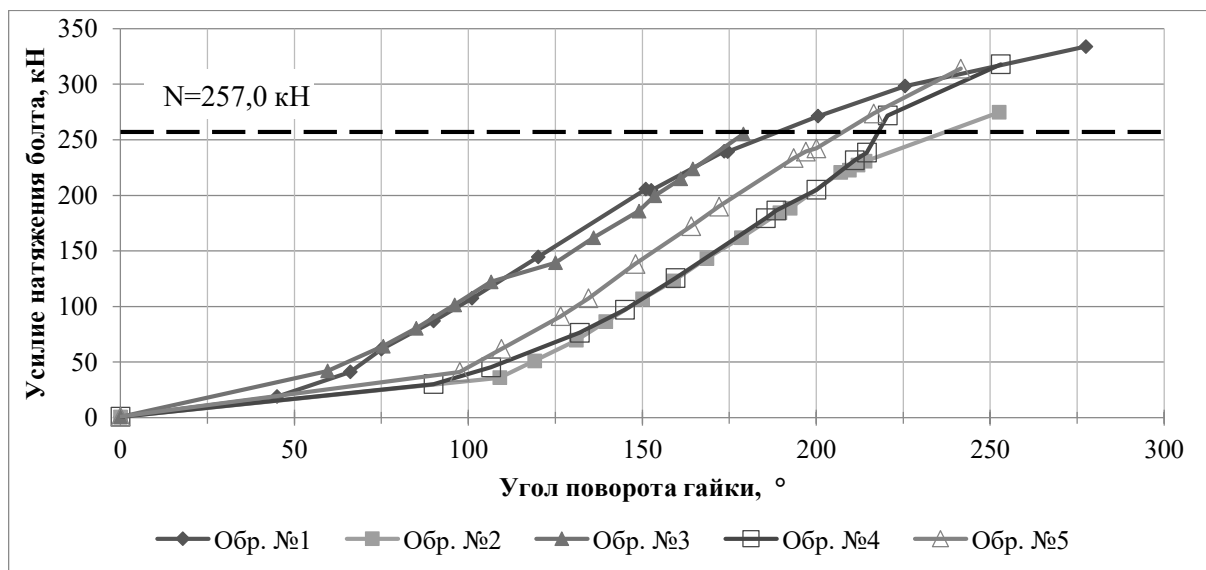


Рис. 6. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M24, 10.9

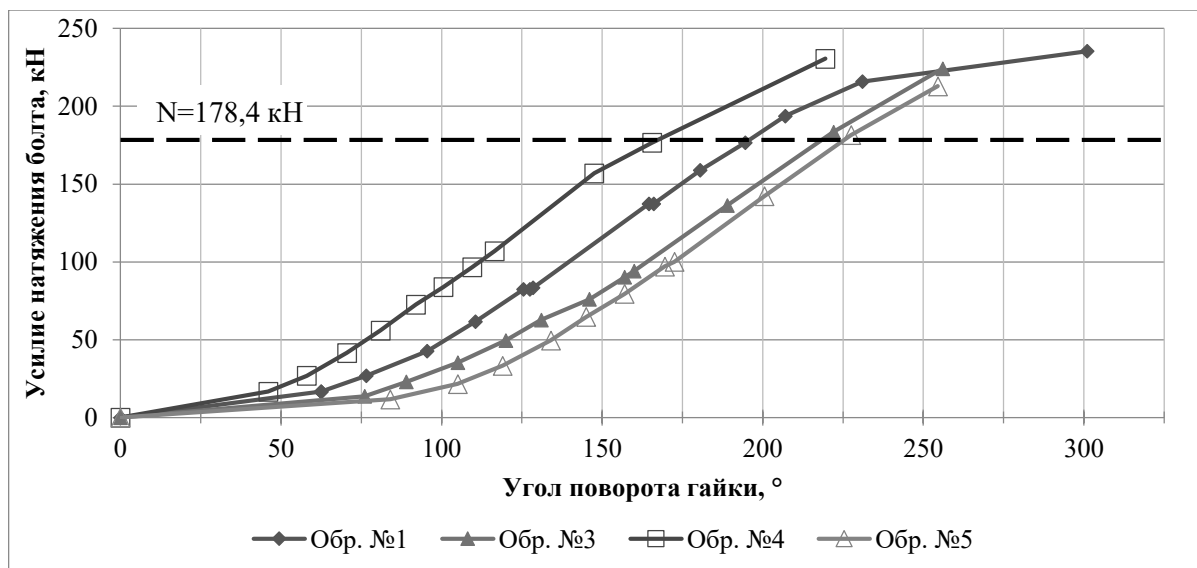


Рис. 7. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M20, 10.9

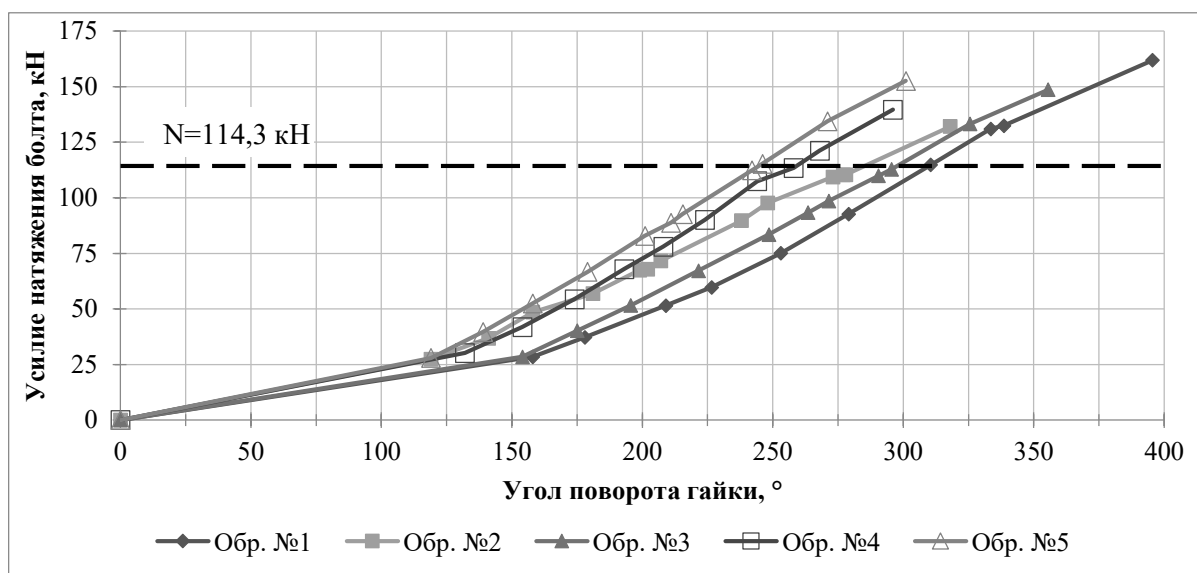


Рис. 8. Зависимость усилия от угла поворота гайки, M16, 10.9

Предположим следующую зависимость усилия натяжения болта от угла поворота гайки. Процесс натяжения болта с этой точки зрения можно разделить на 4 этапа.

Первым этапом, не отраженным на графиках, будет являться свободное накручивание гайки на болт вручную, происходящее до момента относительно плотного контакта гайки с шайбой. На этом этапе усилие в болте близко к нулю.

На втором этапе происходит уплотнение соединения, обжатие шайб и других его элементов. Значительная часть перемещения, вызываемого поворотом гайки, «расходуется» не на создание преднапряжения в болте, а на упругое и пластическое деформирование элементов соединения, приведение их в контакт, так называемое обжатие. Зависимость усилия в болте от угла поворота на этом этапе нелинейная.

Третий этап характеризуется линейной зависимостью между углом поворота (перемещением) и усилием в болте. Можно предположить, что после приведения в контракт всех элементов соединения и его полного обжатия в соединении происходят упругие деформации. Деформируются такие его элементы, как резьба в гайке и болте, пластины, входящие в состав соединения, головка болта, а также непосредственно его стержень. Упругая деформация элементов в соединении отображается на графике линейной зависимостью между углом поворота (перемещением) гайки и усилием в болте.

Четвертый этап, предположительно, характеризуется началом процесса развития пластических деформаций в элементах соединения. В процессе проведения эксперимента не все образцы достигли этого состояния, в основном его можно наблюдать на примере образца № 1 диаметра

М24. На этом этапе линейная зависимость усилия преднапряжения снова переходит в нелинейную.

Одним из важных вопросов, который возникает при проведении эксперимента, это определение начального угла поворота. С какого момента брать отсчет угла поворота? По данному вопросу можно высказать несколько соображений.

При выполнении исследования мы задавались начальным минимальным моментом, который можно выставить на ключе – для М16 это момент равный 100 Н·м, для М20 $M=100$ Н·м, для болта М24 начальный момент составил 200 Н·м.

Далее момент менялся с шагом 30 Н·м для болтов М16 и М20 и шагом 100 Н·м для болта М24. Положение гайки после закручивания болта на эти моменты принималось за нулевое значение. Мы предполагаем, что начальный момент закручивания в 100 и 200 Н·м можно достичь в условиях строительной площадки применением гайковертов небольшой мощности. Таким образом, метод контроля по углу поворота будет двухстадийный.

Полученные в результате проведения эксперимента значения углов поворота представлены в таблице 2.

Таблица 2

Углы поворота гайки для достижения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов

Болт	М24		М20		М16	
	Угол поворота эксперимент от 200 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа	Угол поворота эксперимент от 100 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа	Угол поворота эксперимент от 100 Н·м, градусов	Значения угла поворота ключа
1	135	max 145° среднее 129°	132	max 133° среднее 124°	132	max 135° среднее 120°
2	144		-		135	
3	120		133		120	
4	131		108		104	
5	119		122		107	

Выводы. Как показывают отечественные и иностранные работы, метод контроля усилия натяжения высокопрочного болта по углу поворота гайки позволяет обеспечить проектную величину усилия в болтах соединений с контролируемым натяжением. При этом использование этого метода дает возможность понизить трудоемкость монтажа таких соединений за счет отсутствия необходимости технического обслуживания – тарировки – динамометрических ключей и проведения испытаний по определению коэффициента закручивания болтов.

В результате разработки экспериментальной установки и проведения эксперимента получены значения углов поворота ключа, необходимые для достижения расчетного усилия натяжения высокопрочных болтов диаметров М24, М20, М16, класса прочности 10.9.

Установлено, что при использовании метода контроля натяжения болта по моменту закручивания на достигнутое усилие натяжения болта влияют геометрические характеристики и состояние резьбы болта и гайки. При наличии дефекта резьбы болта достижение расчетного момента закручивания не обеспечивает расчетное преднапряжение болта.

В качестве развития и уточнения указаний по использованию метода контроля усилия натяжения болта по углу поворота представляется необходимым в дальнейшем исследовать работу соединения с различной толщиной пакета, а

также использовать болты класса прочности 8.8 и 12.9. Подобные исследования могут дать возможность применять описанный метод при монтаже широкого ряда соединений металлических конструкций на болтах с контролируемым натяжением.

Благодарности. Авторы выражают благодарность научным работникам лаборатории испытаний строительных материалов изделий и конструкций НИУ МГСУ (ЛИСМИиК) и ее заведующему В.А. Какуше за компетентные предложения и рекомендации при проведении экспериментального исследования, а также профессорам кафедры МДК НИУ МГСУ д.т.н. Туснину Александру Романовичу и д.т.н. Ибрагимову Александру Майоровичу за ценные замечания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Туснин А.Р., Линьков Н.В., Клюкин А.А. Исследование несущей способности и деформативности соединений деревянных конструкций с применением композиционных материалов // Строительные материалы. 2023. № 10. С. 99–108. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108.
2. Тамразян А.Г., Карандеев М.В. К анализу методик оценки сейсмостойкости узла сопряжения безбалочной плиты перекрытия. В сборнике: Безопасность строительного фонда

России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курск, 2023. С. 144–149.

3. Линьков Н.В. Несущая способность деревянных балок составного сечения на соединении «км-вкладыш» // Вестник МГСУ. 2011. № 1–2. С. 161–166.

4. Карпенко С.Н., Травуш В.И., Чепизубов И.Г. Определение деформативности и прочности муфтовых соединений арматуры. Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2015. Т. 11. № 4. С. 70–76.

5. Емельянов С.Г., Федорова Н.В., Колчунов В.И. Особенности проектирования узлов конструкций жилых и общественных зданий из панельно-рамных элементов для защиты от прогрессирующего обрушения // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 23–27.

6. Колчунов В.И., Травуш В.И., Илющенко Т.А., Шубин И.Л. Платформенный сборно-монолитный стык. Патент на изобретение RU 2836701 С2, 19.03.2025. Заявка № 2023124158 от 19.09.2023.

7. Дежин М.А., Ибрагимов А.М. Узел соединения колонн и ригелей с применением деревянных элементов на металлических накладках и клееввинченных шурупах. Патент на полезную модель RU 222579 U1, 11.01.2024. Заявка № 2023111649 от 05.05.2023.

8. Мысак В.В., Туснина О.А., Данилов А.И., Туснин А.Р. Особенности работы соединений металлических элементов на заклепках различных типов // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 82–91.

9. Травуш В.И., Конин Д.В. Численное исследование стыков с фрезерованными торцами колонн коробчатого и двутаврового сечений // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 4. С. 69–74.

10. Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В. Испытания узловых соединений купола со стержнями из тонкостенных холодногнутых стальных профилей // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2014. № 17. С. 199–202.

11. Просяников Б.Д. Болтовое соединение с взаимным продавливанием соединяемых тонкостенных профилей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2 (55). С. 130–138.

12. Шафрай К.А., Шафрай С.Д. Особенности работы фланцевых соединений архитектурно-строительных конструкций. внецентренное растяжение болтов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 84–92.

13. Решетников А.А., Леонова Д.А., Корнет В.Ю. Несущая способность и живучесть шарнирного узла крепления балок к колоннам на 2-х болтах // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799.

14. Алексеева Е.А. Монтажные стыки металлических балок на болтах. Аллея науки. 2018. Т. 3. № 6 (22). С. 433–437.

15. Шемелова Е.С. Фрикционные соединения металлических конструкций. В сборнике: Технология строительного производства. Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 190-летию Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (ЛИСИ – СПбГАСУ). Санкт-Петербург, 2022. С. 219–223.

16. Гладштейн Л.И., Бабушкин В.М. Высокопрочные болты класса прочности 12.9 в монтажных соединениях строительных металлоконструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 37–39.

17. Павлов А.Б., Бормот Ю.Л., Бабушкин В.М. Фрикционные соединения стальных конструкций из проката большой толщины // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 5. С. 25–27.

18. Тихоньких С.С., Чечель М.В. Особенности соединений на высокопрочных болтах. В сборнике: Архитектура, Строительство, Землеустройство И Кадастры На Дальнем Востоке В XXI веке. материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». 2016. С. 208–213.

19. Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Макаров А.И., Морина Е.А. Напряженно-деформированное состояние фрикционных соединений с лазерной обработкой контактных поверхностей // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82.

20. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Влияние зазоров на напряженное состояние фланцевых соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 2024. № 6 (317). С. 19–26. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.19.26.

21. Коваленко А.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В., Соловьев Д.В. Экспериментальное исследование коэффициента трения фрикционных болтовых соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 4 (303). С. 61–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67.

22. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Экспериментальное исследование фрикционных болтовых соединений из высокопрочных

статей // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 24–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33.

23. Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I. Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the din standard. E3S Web of Conferences. 2023. № 389, 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080.

24. Василькин А.А., Зубков Г.В., Прокаев С.А., Василькин И.А. Размер площадки трения фрикционного болтового соединения // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. С. 61–74. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4.

25. Василькин А.А., Зубков Г.В. Деформация элементов сдвигоустойчивых соединений при предварительном натяжении болта // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2024: сборник докладов V Национальной научной конференции (г. Москва, 16 декабря 2024 г.). Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2025. С. 22–29.

26. Monville J-M. Optimal tightening process of bolted joints. // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. № 7. DOI: 10.1051/smdo/2016005.

27. Chaki S., Corneloup G., Lillamand I., Walaszek H. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. // ASME. Pressure Vessel Technology. August 2007. № 129(3). С. 383–390. DOI: 10.1115/1.2748821

28. Berenbak J. Evaluation tightening pre-loaded bolt assemblies according to EN 1090-2 “Technical requirements for steel structures” for 95% reliability EN 1990. Delft University of Technology. 2012. 36 с.

29. Kulak G.L. High Strength Bolting for Canadian Engineers. Canadian Institute Of Steel Construction. 2005. 56 с.

30. СП 70.13330.2012. Свод правил. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87" (ред. от 22.11.2023)

Информация об авторах

Василькин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, г. Москва, 129337, Ярославское ш., 26.

Георгий Владиславович Зубков, аспирант 4 курса Института промышленного и гражданского строительства. E-mail: gronar363@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Россия, г. Москва, 129337, Ярославское ш., 26.

Поступила 17.11.2025 г.

© Василькин А.А., Зубков Г.В., 2026

**Vasilkin A.A., Zubkov G.V.*

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

STRESS-STRAIN STATE OF SLIP-CRITICAL CONNECTIONS IN METAL STRUCTURES, WITH REGARD TO THE SPECIFICS OF BOLT TENSION CONTROL

Abstract. A slip-critical connection using high-strength bolted assemblies is a tension-controlled connection, since reliable provision of a specified tension force is necessary to guarantee the design performance of the connection. A number of methods for accomplishing this task are known, but only one of them is sufficiently well regulated and used in practice – the torque method. The use of alternative methods of bolt tension control may make it possible to improve the reliability of tension-controlled bolted connections and eliminate the need for calibration of torque wrenches and tests to determine the tightening coefficient. An experimental study of the tensioning process for high-strength bolt sets of various diameters – M16, M20, and M24 – has been carried out in this article. An experimental setup has been developed, which has been used to study the controlled tension of bolts. The relationship between the angle of rotation of the nut, the torque applied to it using a torque wrench, and the bolt tension force was determined.

Keywords: slip-critical connection, bolted joint, bolt pretensioning, high-strength bolts, steel high-strength bolted connection

REFERENCES

1. Tusnin A.R., Lin'kov N.V., Klyukin A.A. Study of the load-bearing capacity and deformability

of connections of wooden structures using composite materials [Issledovanie nesushchej sposobnosti i deformativnosti soedinenij derevyannyh konstrukcij s primenением kompozicionnyh materialov]. Building

materials [Stroitel'nye materialy]. 2023. No. 10. Pp. 99–108. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-818-10-99-108. (rus)

2. Tamrazyan A.G., Karandeev M.V. To the analysis of methods for assessing the seismic resistance of the joint of a beamless floor slab [K analizu metodik ocenki sejsmostojkosti uzla sopryazheniya bezbalochnoj plity perekrytiya]. Safety of Russia's Construction Stock: Problems and Solutions. Proceedings of the International Academic Conference. Kursk [Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy Mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij. Kursk], 2023. P. 144–149. (rus)

3. Lin'kov N.V. Load-bearing capacity of composite timber beams with a «CM-liner» connection [Nesushchaya sposobnost' derevyannyh balok sostavnogo secheniya na soedinenii «km-vkladysh»] MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2011. No. 1–2. Pp. 161–166. (rus)

4. Karpenko S.N., Travush V.I., Chepizubov I.G. Determination of the deformability and strength of coupling connections of reinforcement [Opredelenie deformativnosti i prochnosti muftovyh soedinenij armatury]. International Journal of Civil and Structural Engineering [Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstrukcij]. 2015. Vol. 11. No. 4. Pp. 70–76. (rus)

5. Emel'yanov S.G., Fedorova N.V., Kolchunov V.I. Design features of structural units of residential and public buildings made of panel-frame elements to protect against progressive collapse [Osobennosti proektirovaniya uzlov konstrukcij zhilyh i obshchestvennyh zdaniy iz panel'no-ramnyh elementov dlya zashchity ot progressivnykh obrusheniya]. Building materials [Stroitel'nye materialy]. 2017. No. 3. Pp. 23–27. (rus)

6. Kolchunov V.I., Travush V.I., Il'yushchenko T.A., Shubin I.L. Platform precast-monolithic joint [Platformennyj sborno-monolitnyj styk]. Patent for invention RU 2836701 C2, 19.03.2025. Application No. 2023124158, 19.09.2023. (rus)

7. Dezhin M.A., Ibragimov A.M. A connection unit for columns and beams using wooden elements on metal plates and glued screws [Uzel soedineniya kolonn i rigelej s primeneniem derevyannyh elementov na metallicheskih nakladkah i kleevvinchenykh shurupah]. Patent for a utility model RU 222579 U1, 11.01.2024. Application No. 2023111649, 05.05.2023. (rus)

8. Mysak V.V., Tushina O.A., Danilov A.I., Tushin A.R. Features of the operation of connections of metal elements using rivets of various types [Osobennosti raboty soedinenij metallicheskih elementov na zaklepkah razlichnykh tipov]. MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2014. No. 3. Pp. 82–91. (rus)

9. Travush V.I., Konin D.V. Numerical study of joints with milled ends of box-section and I-beam columns [Chislennoe issledovanie stykov s frezerovannymi torcami kolonn korobchatogo i dvutavrovogo sechenij]. Academia. Architecture and Construction [Academia. Arhitektura i stroitel'stvo]. 2010. No. 4. Pp. 69–74. (rus)

10. Holopov I.S., Tur V.I., Tur A.V. Testing of dome nodal connections with rods made of thin-walled cold-formed steel sections [Ispytaniya uzlovyh soedinenij kupola so sterzhnyami iz tonkostennykh holodnognutyyh stal'nykh profilej]. Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences [Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arhitektury i stroitel'nyh nauk]. 2014. No. 17. Pp. 199–202. (rus)

11. Prosyankov B.D. Bolted connection with mutual pushing of connected thin-walled profiles [Boltovoe soedinenie s vzaimnym prodavlivaniem soedinyayemykh tonkostennykh profilej]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta]. 2016. No. 2 (55). Pp. 130–138. (rus)

12. Shafraj K.A., Shafraj S.D. Features of flange joints in architectural structures. Eccentric bolt tension [Osobennosti raboty flancevyh soedinenij arhitekturno-stroitel'nyh konstrukcij. Vnecentrennoe rastyazhenie boltov]. News of Higher Education Institutions. Construction [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo]. 2013. No. 7 (655). Pp. 84–92. (rus)

13. Reshetnikov A.A., Leonova D.A., Kornet V.Y. Load-bearing capacity and durability of the hinged joint for fastening beams to columns using 2 bolts [Nesushchaya sposobnost' i zhivuchest' sharnirnogo uzla krepleniya balok k kolonnam na 2-h boltah]. Engineering Bulletin of the Don [Inzhenernyj vestnik Dona]. 2018. No. 1 (48). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4799. (rus)

14. Alekseeva E.A. Assembly joints of metal beams with bolts [Montazhnye styki metallicheskih balok na boltah]. Alley of Science [Alleya nauki]. 2018. Vol. 3. No. 6 (22). Pp. 433–437. (rus)

15. Shemelova E.S. Friction connections of metal structures [Frikcionnye soedineniya metallicheskih konstrukcij]. Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 190th anniversary of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering [Materialy Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 190-letiyu Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta]. St. Petersburg, 2022. Pp. 219–223. (rus)

16. Gladshetj L.I., Babushkin V.M. High-strength bolts of strength class 12.9 in assembly joints of building metal structures [Vysokoprochnye bolty klassa prochnosti 12.9 v montazhnyh soedineniyah stroitel'nyh metallokonstrukcij]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2011. No. 6. Pp. 37–39. (rus)
17. Pavlov A.B., Bormot Yu.L., Babushkin V.M. Friction joints of steel structures made of thick rolled products [Frikcionnye soedineniya stal'nyh konstrukcij iz prokata bol'shoj tolshchiny]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2008. No. 5. Pp. 25–27. (rus)
18. Tihon'kih S.S., Chechel' M.V. Features of connections with high-strength bolts [Osobennosti soedinenij na vysokoprochnykh boltah.]. Proceedings of the international scientific and practical conference. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Komsomolsk-on-Amur State Technical University» [Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBOU VO «Komsomol'skij-na-Amure gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet»]. 2016. Pp. 208–213. (rus)
19. Martynov G.V., Monastyreva D.E., Makarov A.I., Morina E.A. Stress-strain state of friction joints with laser treatment of contact surfaces [Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye friktsionnykh soyedineniy s lazernoy obrabotkoy kontaktnykh poverkhnostey]. MGSU Bulletin [Vestnik MGSU]. 2019. Vol. 14. Issue. 1. Pp. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.72-82. (rus)
20. Vedyakov I.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V. The influence of gaps on the stress state of flange joints [Vliyanie zazorov na napryazhennoe sostoyanie flancevykh soedinenij]. Construction mechanics and calculation of structures [Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy]. 2024. No. 6 (317). Pp. 19–26. DOI: 10.37538/0039-2383.2024.6.19.26. (rus)
21. Kovalenko A.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V., Solov'yev D.V. Experimental study of the friction coefficient of friction bolted joints [Eksperimental'noye issledovaniye koeffitsiyenta treniya friktsionnykh boltovykh soyedineniy]. Construction mechanics and calculation of structures [Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy]. 2022. No. 4 (303). Pp. 61–67. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.4.61.67. (rus)
22. Vedyakov I.I., Konin D.V., Nakhval'nov P.V. Experimental study of friction bolted joints made of high-strength steels [Eksperimental'noye issledovaniye friktsionnykh boltovykh soyedineniy iz vysokoprochnykh staley]. Industrial and civil construction [Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo]. 2022. No. 7. Pp. 24–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.07.24-33. (rus)
23. Vasilkin A., Akhmetzyanov R., Zubkov G., Vasilkin I. Experimental determination of the tightening coefficient of bolts according to the din standard. E3S Web of Conferences. 2023. No. 389, 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901080. (rus)
24. Vasilkin A.A., Zubkov G.V., Prokaev S.A., Vasilkin I.A. Friction area of a slip-critical bolt connection [Razmer ploshchadki treniya frikcionnogo boltovogo soedineniya]. Construction: science and education [Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie]. 2024. Vol. 14. Issue. 1. Pp. 61–74. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4. (rus)
25. Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Deformation of slip-critical connection elements during pretensioning of the bolt [Deformatsiya elementov sdvigoustojchivyykh soedinenij pri predvaritel'nom natyazhenii bolta]. Current Issues in Construction and Education — 2024: Proceedings of the V National Scientific Conference (Moscow, December 16, 2023). Moscow: Moscow State University of Civil Engineering Publishing House [Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya — 2024: sbornik dokladov V Nacional'noj nauchnoj konferencii (g. Moskva, 16 dekabrya 2024 g.). Moskva : Izdatel'stvo MISI – MGSU], 2025. Pp. 22–29. (rus)
26. Monville J-M. Optimal tightening process of bolted joints. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. № 7. DOI: 10.1051/smdo/2016005.
27. Chaki S., Corneloup G., Lillamand I., Walaszek H. Combination of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Waves for In Situ Control of the Tightening of Bolts. ASME. Pressure Vessel Technology. August 2007. No. 129(3). Pp. 383–390. DOI: /10.1115/1.2748821
28. Berenbak J. Evaluation tightening preloaded bolt assemblies according to EN 1090-2 «Technical requirements for steel structures» for 95 % reliability EN 1990. Delft University of Technology. 2012. 36 p.
29. Kulak G.L. High Strength Bolting for Canadian Engineers. Canadian Institute Of Steel Construction. 2005. 56 p.
30. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87" (rev. 22.11.2023).

Information about the authors

Vasilkin, Andrey A. PhD. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. National Research «Moscow State University of Civil Engineering» (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavl'skoe sh., 26.

Zubkov, Georgiy V. Graduate student, Industrial and Civil Engineering Institute. E-mail: gronar363@gmail.com. National Research «Moscow State University of Civil Engineering» (NRU MGSU). Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26.

Received 17.11.2025

Для цитирования:

Василькин А.А., Зубков Г.В. Экспериментальное определение угла поворота гайки для натяжения высокопрочных болтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31

For citation:

Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Stress-strain state of slip-critical connections in metal structures, with regard to the specifics of bolt tension control. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-19-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-32-43

Петров М.М.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: michaelpetrov1998@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ХЛАДАГЕНТА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. В статье рассматриваются зависимости, описывающие влияние рабочего тела парокомпрессионного воздушного теплового насоса (ТН), встраиваемого в приточно-вытяжные вентиляционные установки, на его эксплуатационные характеристики (коэффициент преобразования энергии, величину нагрева воздуха, удельную объемную теплопроизводительность, максимальное абсолютное давление в элементах холодильного контура, затрачиваемую электрическую мощность приводом компрессора и степень сжатия в нем). Приводятся зависимости аппроксимирующих кривых, описывающих энтальпию и энтропию хладагентов R22, R32, R134a, R152a и R410a в зоне перегретого пара.

Для анализа характеристик встраиваемых тепловых насосов приняты хладагенты R134a, R22, R32, R152a, R410a. Установлено, что хладагенты R32 и R410a наиболее благоприятны для применения во встраиваемом ТН за счет относительно высокой удельной теплопроизводительности, что влечет за собой меньшую металлоемкость холодильного оборудования в стесненных условиях вентиляционных установок. Хладагенты R134a и R152a характеризуются высокой степенью сжатия по сравнению с другими фреонами. Использование их в ТН приточно-вытяжной установки компоновки с размещением испарителя теплового насоса после утилизатора теплоты по ходу удаляемого воздуха влечет за собой необходимость организации двухступенчатого сжатия при экстремально низких температурах воздуха.

Ключевые слова: вентиляция, приточно-вытяжные установки, воздушный тепловой насос, хладагент.

Введение. Развитие экономики и повышение уровня жизни порождает стремительный рост спроса на энергоносители. Всё чаще поднимается вопрос об энергоэффективности внутренних инженерных систем. Одним из путей снижения энергопотребления такими системами является применение тепловых насосов (ТН). В исследованиях рассматриваются различные способы их применения в системах вентиляции и кондиционирования воздуха [1–9]. Особое внимание уделяется воздушным тепловым насосам в установках с утилизаторами теплоты удаляемого вентиляционного воздуха [9–12]. Использование ТН в таких системах позволяет снизить энергозатраты на подогрев приточного воздуха до 60 % [13].

Отличительной особенностью воздушных тепловых насосов, используемых в приточно-вытяжных установках, от тепловых насосов для горячего водоснабжения и напольного отопления в том, что параметры высокопотенциальной среды в системе вентиляции меняются вслед за параметрами наружного воздуха. Это во многом усложняет задачу анализа работы такого холодильного оборудования, так как его моделирование должно производиться совместно со всеми элементами приточно-вытяжной установки.

Помимо параметров низко- и высокопотенциальной среды, энергетическая эффективность

ТН определяется выбором рабочего тела – хладагента. Однако в существующей литературе этому уделяется недостаточно внимания. Выбор рабочего тела зависит как от эксплуатационных параметров холодильной машины, так и от совокупности термодинамических, физических и химических свойств хладагента. Хладагенты по составу принято разделять на азеотропные и неазеотропные. Отличительной особенностью вторых от первых является наличие температурного глайда. В данном исследовании рассматриваемый неазеотропный хладагент R410a имеет температурный глайд меньше 0,3К, поэтому его можно считать практически зеотропным. Помимо прочего каждый фреон обладает своими исключительными свойствами, например, значением критической температуры, которая оказывает существенное влияние на энергетическую эффективность холодильной машины [14].

Рекомендации по выбору рабочего тела парокомпрессионного воздушного ТН, встраиваемого в приточно-вытяжные вентиляционные установки с утилизаторами теплоты, в рассмотренных литературных источниках отсутствуют. Также не приведены эксплуатационные характеристики (коэффициент преобразования энергии, величина нагрева воздуха, удельная объемная

теплопроизводительность, максимальное абсолютное давление в элементах холодильного контура и др.).

Цель работы: сравнительный анализ и определение оптимальных областей применения различных рабочих тел (хладагентов) в парокомпрессионном воздушном ТН, встраиваемом в приточно-вытяжные вентиляционные установки с утилизацией теплоты, по критериям энергоэффективности, тепловой производительности, компактности и пригодности для различных климатических условий.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка и верификация расчетной модели работы теплового насоса в составе приточно-вытяжной вентиляционной установки с утилизаторами теплоты удаляемого воздуха;
- создание программного комплекса для расчета цикла теплового насоса, пластинчатого утилизатора теплоты и теплообменных аппаратов в приточно-вытяжной установке;
- проведение параметрического исследования влияния рабочего тела на эксплуатационные показатели приточно-вытяжных установок со встраиваемым ТН при различных компоновках утилизаторов теплоты и тепловых насосов;
- сравнительный анализ и формулирование рекомендаций по выбору рабочих тел (хладагентов) и проектированию приточно-вытяжных установок со встраиваемым воздушным ТН.

Материалы и методы. Приточно-вытяжная установка со встраиваемым воздушным ТН может иметь различную компоновку [11, 12]. В работе объектом исследования являются приточно-вытяжные вентиляционные установки, в которых утилизация теплоты осуществляется как холодильной машиной, так и теплообменником «воздух-воздух» (рисунок 1). Встраиваемый тепловой насос в качестве низкопотенциальной среды использует удаляемый воздух из помещения, а высокопотенциальной средой выступает наружный воздух.

Для ТН, встраиваемого в приточно-вытяжную установку, как таковой бивалентной температуры не существует, что является его отличительной особенностью от классических тепловых насосов, которые используют в качестве низкопотенциального источника теплоты наружный воздух. В данном случае низкопотенциальная среда имеет относительно постоянные параметры на протяжении всего холодного периода года. Для теплового насоса, изображенного на рис. 1,а, за счет его совместного применения с утилизатором «воздух-воздух» разность температур нагреваемой $t_{н1}$ (на входе в конденсатор) и охлаждаемой $t_{о1}$ (на входе в испаритель) сред изменяется примерно на $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ при изменении температуры наружного воздуха на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, как это показано на рис. 2.

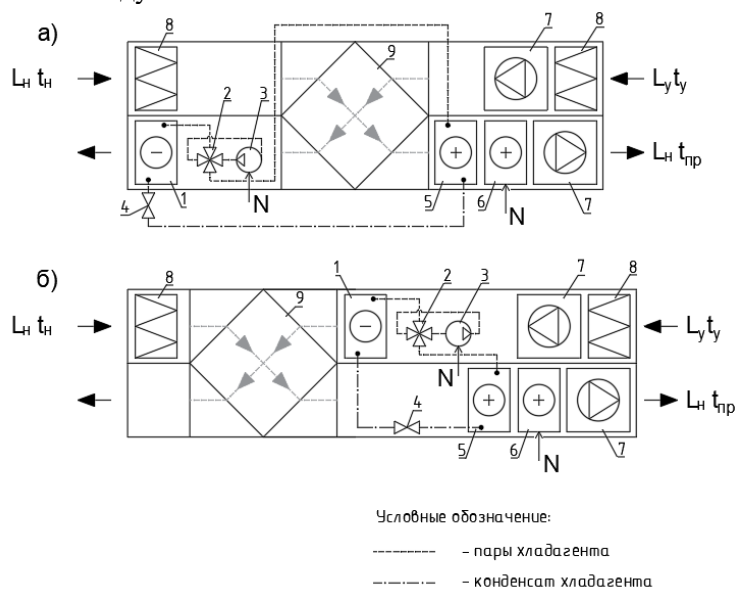


Рис. 1. Приточно-вытяжные установки со встраиваемым тепловым насосом и пластинчатым рекуперативным утилизатором теплоты удаляемого вентиляционного воздуха

- а – размещение испарителя теплового насоса после утилизатора теплоты по ходу удаляемого воздуха;
- б – размещение испарителя теплового насоса до утилизатора теплоты по ходу удаляемого воздуха.

- 1 – испаритель теплового насоса; 2 – четырехходовой клапан; 3 – компрессор; 4 – терморегулирующий вентиль;
 - 5 – конденсатор; 6 – электрический воздухонагреватель; 7 – вентилятор; 8 – фильтр воздушный;
 - 9 – пластинчатый перекрестноточный рекуперативный утилизатор теплоты приточно-вытяжной установки.
- $t_{н}, t_{у}$ – температура наружного и удаляемого воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{пр}$ – температура приточного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $L_{н}, L_{у}$ – расход воздуха наружного и удаляемого воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$.

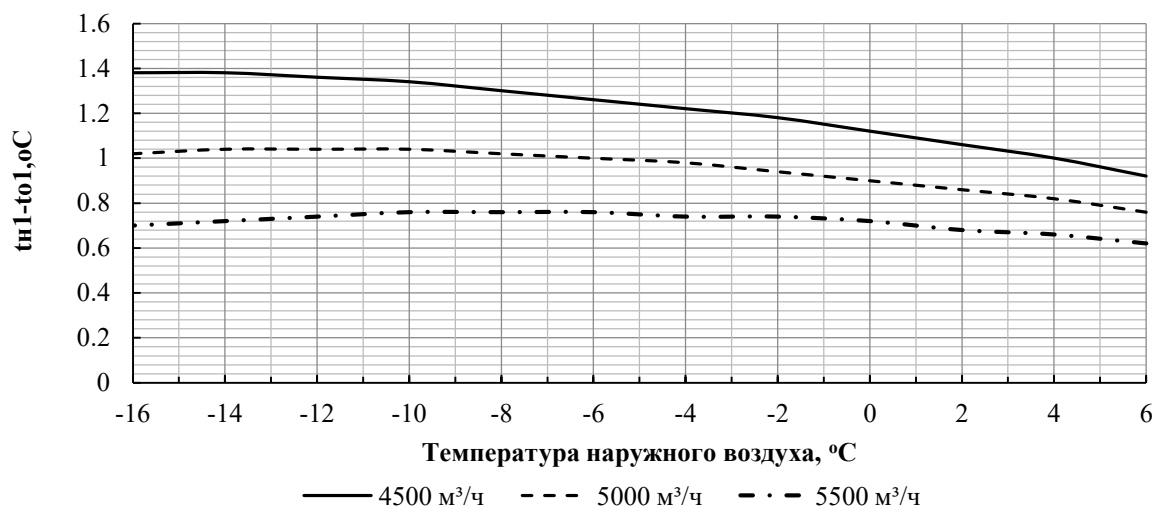


Рис. 2. Изменение разности температур между нагреваемой и охлаждаемой средами компоновки «а» при различных расходах обрабатываемого воздуха

При размещении испарителя ТН перед утилизатором «воздух-воздух», как это показано на рис. 1,б, режим работы холодильной машины

полностью меняется. Изменение разности температур нагреваемой и охлаждаемой сред практически соответствует изменению температуры наружного воздуха.

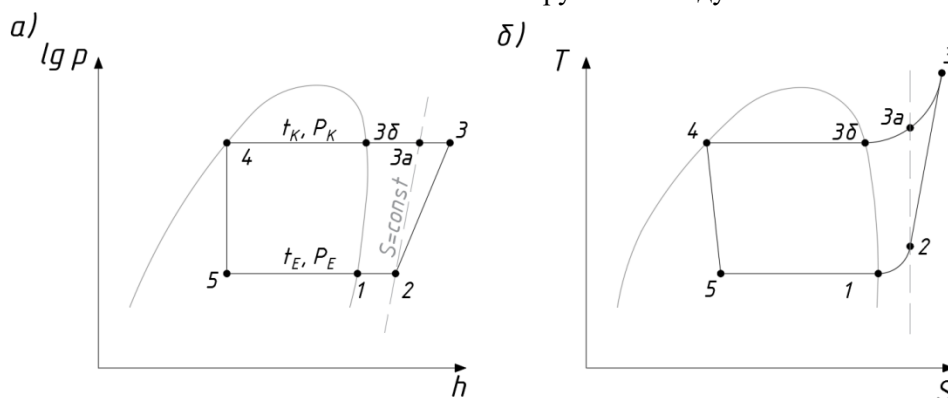


Рис. 3. Теоретический цикл теплового насоса на $\lg p$ - h -диаграмме (а) и T - S -диаграмме (б)

Расчет цикла теплового насоса сводится к определению энтальпий рабочего тела во всех его точках, как это показано на рисунке 3. Основным показателем, характеризующим эффективность теплового насоса, является коэффициент преобразования энергии (КПЭ) [14]:

$$\text{КПЭ} = Q_m / N(1)$$

где Q_m – теплопроизводительность теплового насоса, Вт; N – электрическая энергия, затрачиваемая на привод компрессора, Вт.

Зависимость (1) также можно записать следующим образом:

$$\text{КПЭ} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad (2)$$

В свою очередь энтальпия рабочего тела на нагнетании компрессора определяется по соотношению:

$$h_3 = h_2 + \frac{h_{3a} - h_2}{\eta_a} \quad (3)$$

где h_2 , h_3 , h_{3a} , h_4 – энтальпии точек цикла теплового насоса, кДж/кг (Дж/кг); η_a – адиабатный КПД компрессора;

$$\eta_a = 0,98 \frac{273 + t_E}{273 + t_K}, \quad (4)$$

здесь t_E – температура кипения хладагента, $^\circ\text{C}$; t_K – температура конденсации хладагента, $^\circ\text{C}$

Одним из способов расчета параметров холодильного цикла является графоаналитический способ. Однако такой путь не позволяет автоматизировать процесс моделирования и осуществлять прогнозирование работы теплового насоса на произвольном диапазоне входных данных, например, температур наружного воздуха. Для проведения исследования влияния выбора рабочего тела на эксплуатационные показатели ТН была разработана математическая модель, для которой был написан программный код на алгоритмическом языке Python [15]. В основе разработанной программы лежат известные методики расчета цикла теплового насоса [3, 16, 17], воздушного пластинчатого утилизатора [18, 19] и теплообменных аппаратов [20–22]. Программа позволяет проводить расчет показателей цикла теплового насоса с различными хладагентами,

его теплообменников и параметров воздуха в приточно-вытяжной установке. Метод расчета совместной работы встраиваемого воздушного ТН и приточно-вытяжной установки, реализуемый программой можно условно разбить на ряд этапов:

- предварительный расчет утилизатора «воздух-воздух» для заданных параметров воздушных потоков со стороны приточного и вытяжного воздуха (первый этап);
 - предварительный расчет цикла ТН на основании результатов первого этапа с выбранным хладагентом (второй этап);
 - проектный расчет теплообменных аппаратов ТН и определение фактических температурных перепадов со стороны воздуха (третий этап);
- для хладагента R134a при $P=1,5...20$ бар

$$h_{2,3a} = (248,72 \cdot S_2 - 51,699) \cdot P_{и,к}^{0,0462 \cdot S_2 - 0,0299}; \quad (5)$$

для хладагента R22 при $P=2...20$ бар

$$h_{2,3a} = (219,73 \cdot S_2 + 283,63) \cdot P_{и,к}^{0,0505 \cdot S_2 - 0,0547}; \quad (6)$$

для хладагента R32 при $P=3...26$ бар

$$h_{2,3a} = (187,09 \cdot S_2 + 38,838) \cdot P_{и,к}^{0,0667 \cdot S_2 - 0,0706}; \quad (7)$$

для хладагента R152a при $P=2...15$ бар

$$h_{2,3a} = (262,51 \cdot S_2 - 81,441) \cdot P_{и,к}^{0,0371 \cdot S_2 - 0,0157}; \quad (8)$$

для хладагента R410a при $P=3...25$ бар

$$h_{2,3a} = (208,78 \cdot S_2 - 8,4959) \cdot P_{и,к}^{0,0622 \cdot S_2 - 0,05}, \quad (9)$$

где $P_{и}$ – давление испарения (h_2), $P_{к}$ – давление конденсации (для h_{3a}), бар; S_2 – энтропия перегретого пара на входе в компрессор, кДж/(кг·К).

для хладагента R134a при $P_{и}=1,5...4$ бар

$$S_2 = 1,898 + 0,0032 \cdot t_2 + 0,0081 \cdot P_{и}^2 - 0,0825 \cdot P_{и}; \quad (10)$$

для хладагента R22 при $P_{и}=2...5$ бар

$$S_2 = 1,966 + 0,0025 \cdot t_2 + 0,0042 \cdot P_{и}^2 - 0,064 \cdot P_{и}; \quad (11)$$

для хладагента R32, при $P_{и}=3...7$ бар

$$S_2 = 2,5647 + 0,0038 \cdot t_2 + 0,0033 \cdot P_{и}^2 - 0,0765 \cdot P_{и}; \quad (12)$$

для хладагента R152a, при $P_{и}=1...4$ бар

$$S_2 = 2,3787 + 0,0039 \cdot t_2 + 0,0126 \cdot P_{и}^2 - 0,1302 \cdot P_{и} \quad (13)$$

для хладагента R410a, при $P_{и}=3...8$ бар

$$S_2 = 2,0971 + 0,0035 \cdot t_2 + 0,0021 \cdot P_{и}^2 - 0,0528 \cdot P_{и}. \quad (14)$$

Для каждой аппроксимирующей функции указан диапазон давлений рабочего тела, при котором коэффициент детерминации составляет 0,999. Рассматриваемые диапазоны давления характерны для хладагентов, применяемых во встраиваемых ТН в приточно-вытяжных установках.

Теплообменные аппараты теплового насоса рассчитываются на основании решения уравнений теплопередачи и теплового баланса:

- повторный расчет первых двух этапов с учетом результатов третьего;

- определение эксплуатационных и энергетических показателей приточно-вытяжной установки.

Для расчета цикла теплового насоса и параметров рабочих тел в зоне перегретого пара были написаны базы данных [15]. В результате получены зависимости свойств хладагентов в виде степенных функций, которые могут быть использованы в машинном методе решения уравнений (2)–(4). Например, энтальпию пара на всасывании и нагнетании компрессора можно определить по следующим соотношениям:

Энтропию рабочего тела на входе в компрессор с учетом перегрева можно определить также на основании аппроксимирующих функций, введенных методом наименьших квадратов:

$$Q = G_1 \cdot C_1 \cdot (t_{11} - t_{12}) \quad (15)$$

$$Q = K \cdot F \cdot \theta \quad (16)$$

$$Q = G_2 \cdot C_2 \cdot (t_{21} - t_{22}) + r \cdot (1 - x) \quad (17)$$

где Q – тепловой поток, Вт; K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С); θ – средняя логарифмическая разность температур, °С; F – площадь теплообменной поверхности, м²; G – массовый

расход, кг/с; C – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·°C); t – температура, °C; r – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; x – массовое расходное паросодержание (при кипении на входе, при конденсации на выходе); индексы: 1 – воздух; 2 – хладагент; 11, 21 – вход; 12, 22 – выход.

Средняя логарифмическая разность температур:

$$\theta = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\ln\left(\frac{\theta_{max}}{\theta_{min}}\right)} \quad (18)$$

где, θ_{max} и θ_{min} – наибольшая и наименьшая разность температур между теплоносителями, °C.

Для определения коэффициента теплоотдачи со стороны конденсирующегося хладагента применяется уравнение Д. Чэддока и Д. Чэйто, полученного на базе формулы Нуссельта [20, 21]:

$$a_n = 0,56 \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu \cdot d_{вн} \cdot \theta_a}} \quad (19)$$

где, r – теплота парообразования фреона, Дж/кг; λ – теплопроводность хладагента Вт/м·K; ρ – плотность хладагента кг/м³; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; $d_{вн}$ – внешний диаметр трубки теплообменника, м; θ_a – разность температур конденсации хладагента и стенки, °C.

Средний по длине трубы коэффициент теплоотдачи кипящего фреона определяется по уравнению С.Н. Богданова [21, 22]:

$$a_a = C \cdot q_a^{0,15} \cdot (\omega\rho)^n \quad (20)$$

где, C и n – коэффициенты, зависящие от свойств рабочего вещества, $\omega\rho$ – массовая скорость, кг/(м²·с); q_a – плотность теплового потока, Вт/м².

Расчет воздушного конденсатора ТН сводится к решению системы уравнений (21) и (22) графоаналитическим способом:

$$q_a = a_a \cdot \theta_a \quad (21)$$

$$q_v = \frac{(\theta - \theta_a)}{\frac{1}{a_v} \frac{d_{in}}{d_o} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} \frac{d_{in}}{d_{ср}}} \quad (22)$$

где, a_a – коэффициент теплоотдачи хладагента, Вт/(м²·°C); d_{in} – внутренний диаметр стенки трубы теплообменника, м; d_o – наружный диаметр стенки трубы теплообменника, м; $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубы теплообменника, м; $d_{ср}$ – средний диаметр трубы теплообменника, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/(м·°C); a_v – коэффициент теплоотдачи от воздуха определяемый по зависимости (23), Вт/(м²·°C).

Коэффициент теплоотдачи от воздуха

$$a_v = 22,35 \cdot (v\rho)^{0,703} \cdot (S_p)^{0,121} \quad (23)$$

где, $v\rho$ – массовая скорость воздуха, кг/(м²·с); S_p – шаг пластин теплообменника, м.

Пользовательский интерфейс разработанной программы показан на рисунке 4.

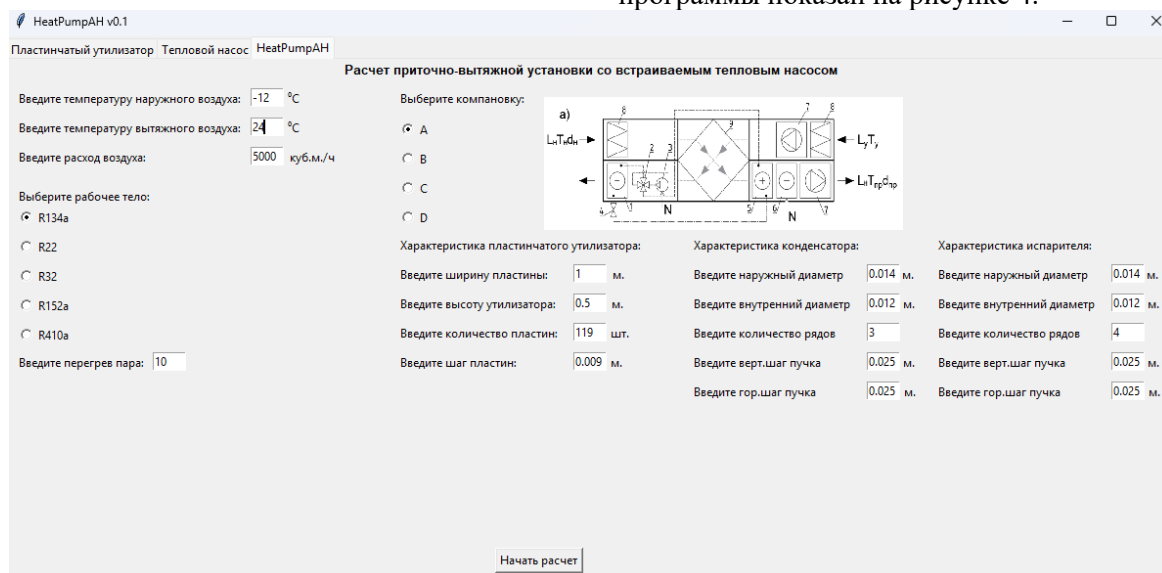


Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы HeatPumpAH v0.1

В рамках текущего исследования была смоделирована работа воздушного встраиваемого ТН на хладагентах R22, R32, R134a, R152a и R410a в диапазоне температур наружного воздуха, t_n , от +6 до –16 °C, при температуре удаляемого воздуха, t_y , +24 °C и расходе со стороны притока и вытяжки $L_y = L_n = 5000$ м³/ч. Поверхности теплообмена конденсатора и испарителя

были приняты в виде 4-х рядных медных трубок 14x0,4 мм с пластинчатым оребрением, шаг пластин 15 мм. В составе приточно-вытяжной установки применен воздухо-воздушный пластинчатый перекрестноточный утилизатор со следующими конструктивными характеристиками: ко-

личество пластин 119, шаг пластин 9 мм, толщина пластин 0,2 мм, высота утилизатора 500 мм, ширина пластин 1000 мм.

Основная часть. На рис. 5 показаны изменения температуры нагреваемой среды перед кон-

денсатором, температуры конденсации и температурной эффективности утилизатора «воздух-воздух» для приточно-вытяжной установки компоновки «а».

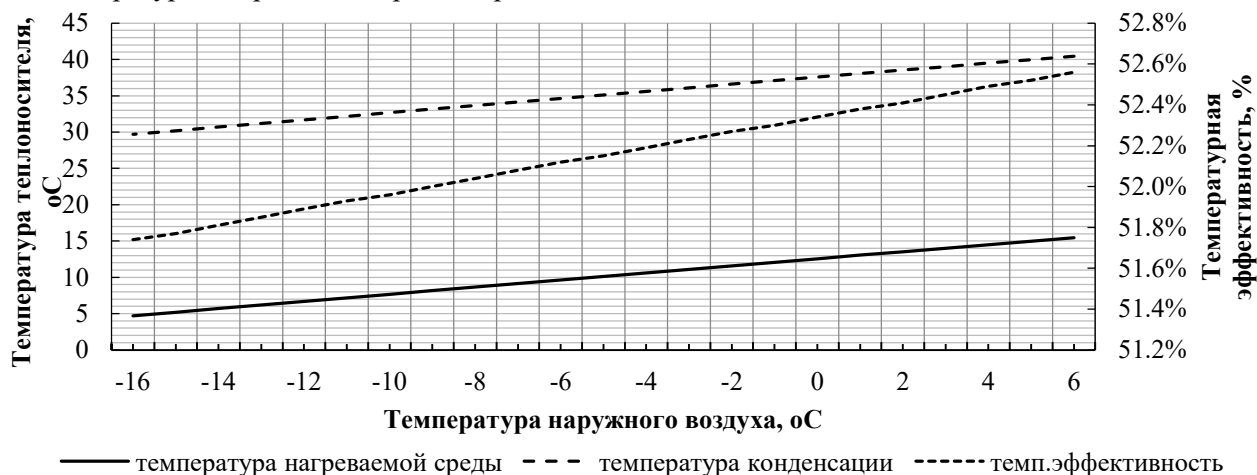


Рис. 5. Изменение температуры нагреваемой среды и конденсации рабочего тела в приточно-вытяжной установке компоновки «а» (рисунок 1)

При снижении температуры наружного воздуха с +6 до -16 °C, температура низкопотенциального источника снижается с 15,46 до 4,7 °C. Так как все фреоны обладают разными теплофизическими и термодинамическими свойствами, то коэффициент теплопередачи от конденсирующего фреона к внутренней поверхности трубок конденсатора будет разным.

Данные о нагреве воздуха Δt_n в конденсаторе для каждого фреона, полученные в результате моделирования работы теплового насоса в приточно-вытяжной установке компоновки «б», показаны на рис. 6.

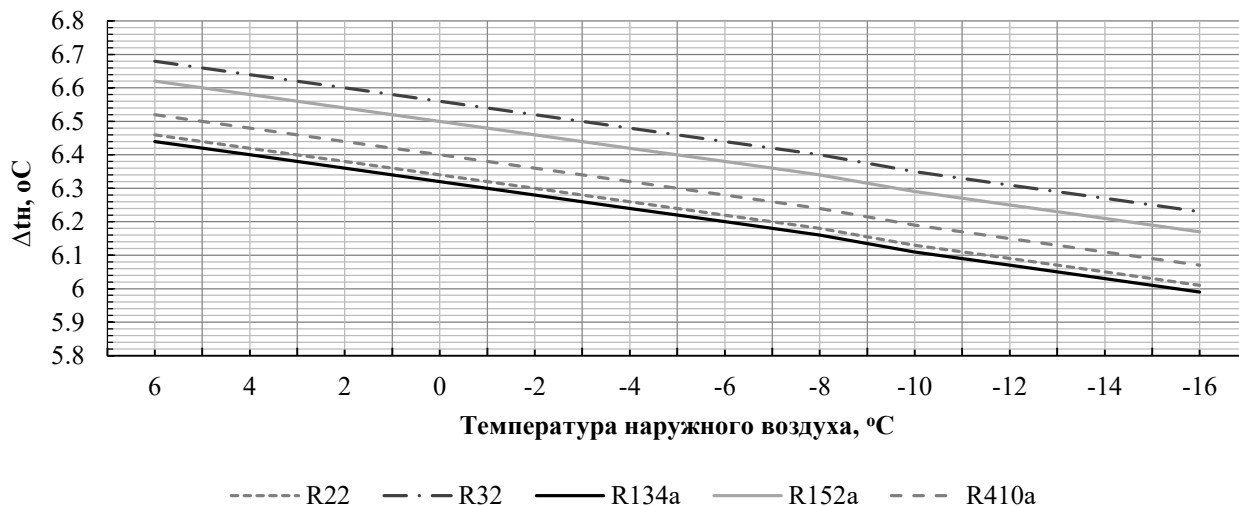


Рис. 6. Величина нагрева воздуха в конденсаторе компоновки «б»

Как показывают исследования [24] использование теплового насоса экономически целесообразно при коэффициенте преобразования энергии больше 2,5. На рисунках 7 и 8 показано его изменение в зависимости от температуры наружного воздуха и компоновки приточно-вытяжной

установки. Представленные данные доказывают высокую эффективность применения воздушных тепловых насосов в системах вентиляции, как встраиваемого оборудования.

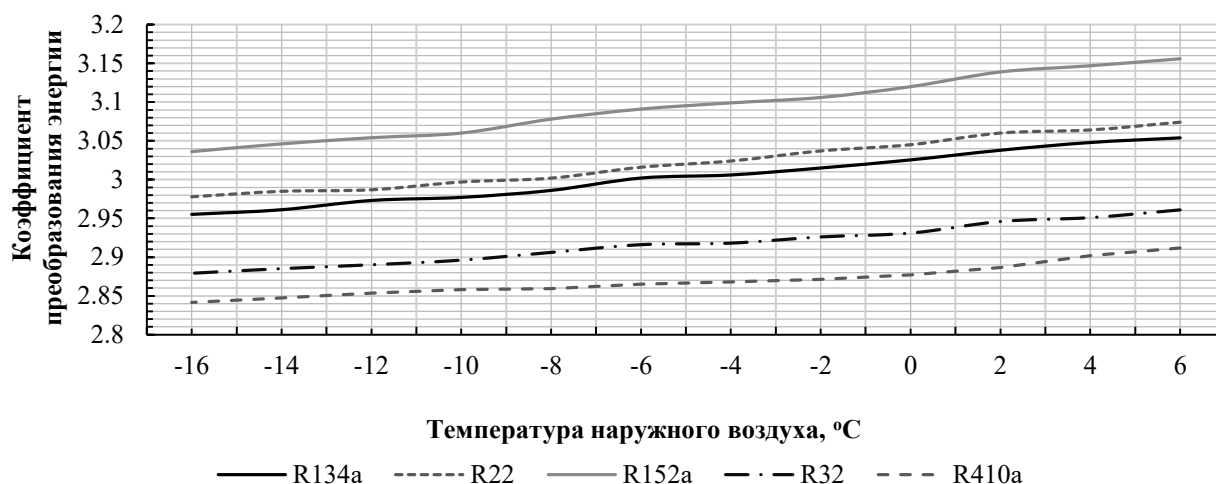


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования энергии от рабочего тела и температуры наружного воздуха для компоновки «а»

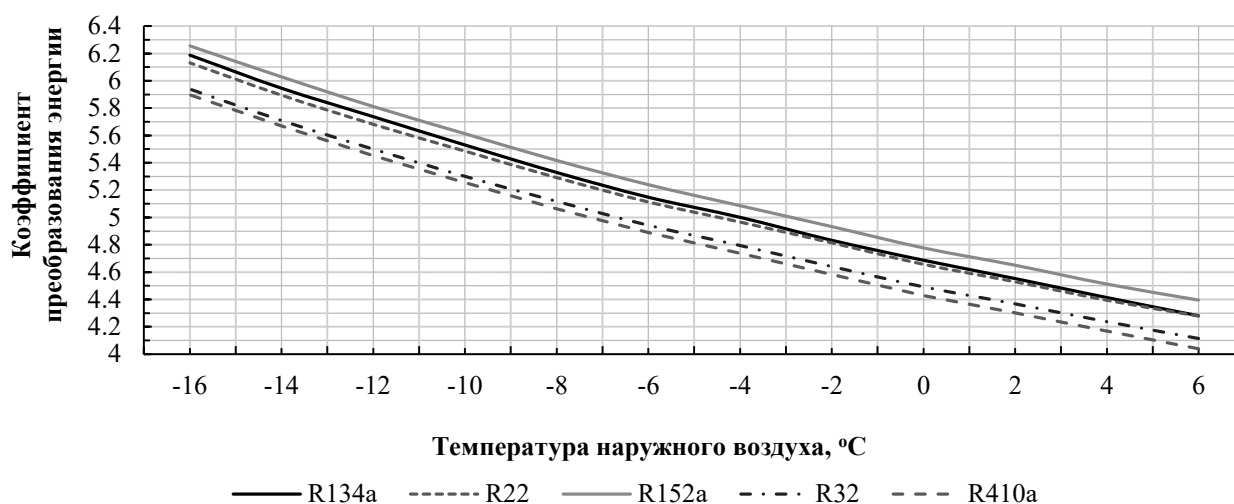


Рис. 8. Зависимость коэффициента преобразования энергии от рабочего тела и температуры наружного воздуха для компоновки «б»

На рис. 9 приведены данные о величине электрической мощности, затрачиваемой приводом компрессора при различных температурах наружного воздуха.

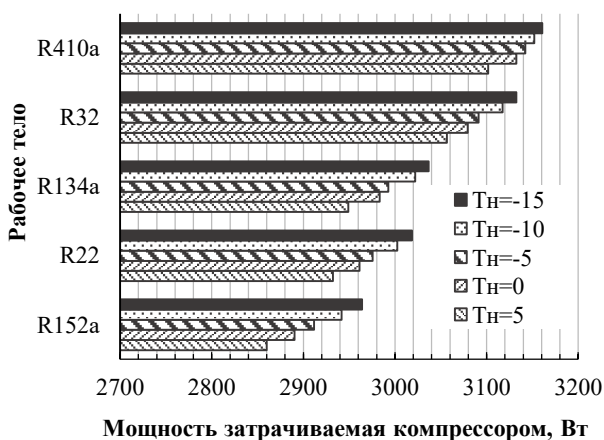


Рис. 9. Зависимость электрической мощности, затрачиваемой компрессором, от температуры наружного воздуха для компоновки «а»

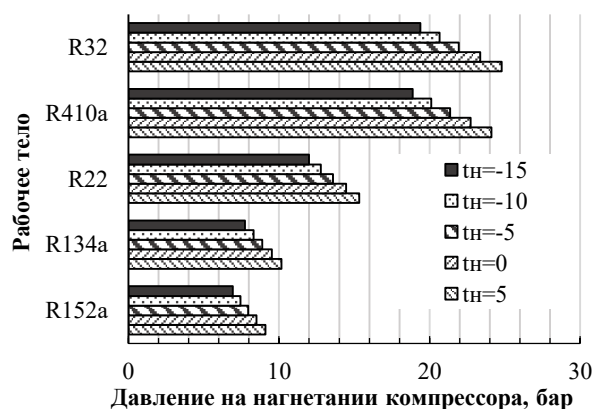


Рис. 10. Зависимость давления на нагнетании компрессора от температуры наружного воздуха для компоновки «а»

Выбор рабочего тела влияет на энергопотребление и величину нагрева высокопотенциальной среды и определяет максимальное рабочее давление на линии нагнетания компрессора, которое необходимо учитывать при конструировании элементов линии высокого давления. На

рис. 10 приведены данные о давлении на нагнетании компрессора при различных температурах наружного воздуха.

Из-за высоких значений давлений хладагентов R32 и R410a трубопроводы должны отвечать требованиям герметичности, в том числе в местах соединения с элементами линии высокого давления. Для хладагентов R134a, R22 и R152a минимальная рекомендуемая толщина стенок конденсатора составляет 0,8 мм, для хладагентов с высоким рабочим давлением этот показатель

возрастает до 1,1 мм, что необходимо компенсировать увеличенным температурным напором на теплообменных аппаратах ТН.

На рисунках 11 и 12 приведены данные о влиянии применяемого хладагента, температуры наружного воздуха на степень повышения давления. Несмотря на то, что хладагенты R32 и R410a обладают наибольшим абсолютным давлением на нагнетании компрессора, максимальная степень сжатия в компрессоре достигается при применении фреонов R134a и R152a.

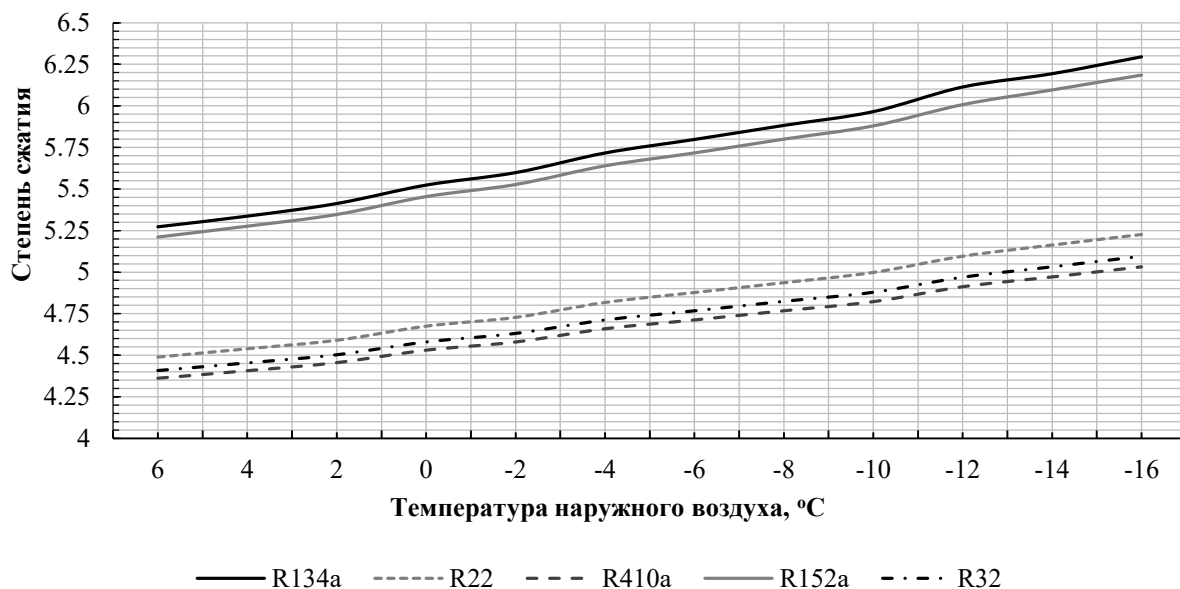


Рис. 11. Зависимость степени сжатия в компрессоре ТН компоновки «а» от температуры наружного воздуха

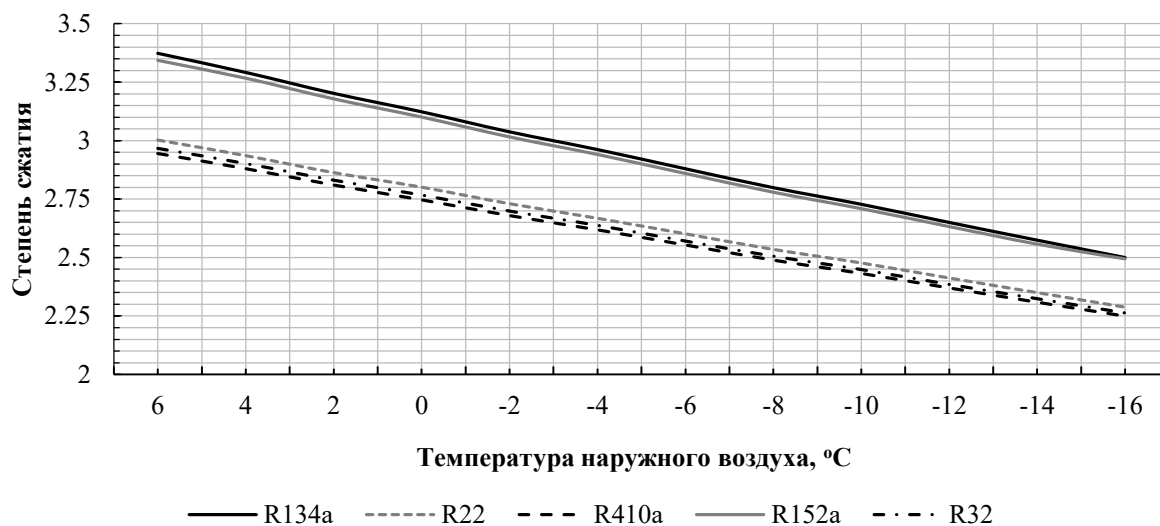


Рис. 12. Зависимость степени сжатия в компрессоре ТН компоновки «б» от температуры наружного воздуха

Особое внимание при проектировании холодильного оборудования уделяется удельной объемной теплопроизводительности, q_v^k , кДж/м³, и холодопроизводительности, q_v^e , кДж/м³:

$$q_v^k = \frac{q_k}{v_1} \quad (21)$$

$$q_v^e = \frac{q_e}{v_1} \quad (22)$$

где q_k и q_e – удельные массовые тепло- и холодопроизводительности, кДж/кг, v_1 – удельный объем рабочего тела, м³/кг.

Данные показатели определяют металлоемкость теплового насоса. На рис. 13 показаны удельные объемные теплопроизводительности для каждого исследуемого хладагента.

Выбор применяемого рабочего тела во встраиваемом ТН оказывает существенное влияние

как на эксплуатационные, так и на конструктивные особенности холодильного и вентиляционного оборудования. Хладагент определяет максимальное абсолютное давление в процессе эксплуатации, а также степень его сжатия в компрессоре. Стоит отметить, что все исследуемые в данной работе фреоны не требуют перехода на двухступенчатое сжатие в диапазоне температур наружного воздуха от $+6$ до -16 °C [24], что является существенным преимуществом использования ТН в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в отличие от низкотемпературных систем отопления и горячего водоснабжения [23]. При проектировании приточно-вытяжной установки компоновки «а» в регионах с экстремально низкими температурами целесообразно применять фреоны R410a и R32 из-за относительно низкой степени сжатия хладагента.

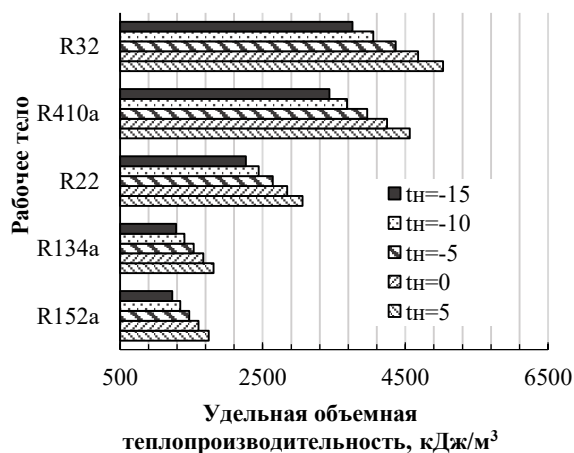


Рис. 13. Удельная объемная теплопроизводительность для компоновки «а»

Удельная объемная теплопроизводительность фреона R32 при $t_n = -15$ °C на 9 % выше, чем у R410a, на 40 % выше, чем у R22 и на 68 % выше, чем у R152a. Благодаря высокой плотности рабочих тел тепловые насосы, работающие на хладагентах R32 и R410a, требуют меньшего размера элементов холодильного оборудования, что является существенным преимуществом при внедрении теплового насоса в стесненные условия приточно-вытяжной установки.

За счет более высоких параметров теплофизических и термодинамических свойств при конденсации максимальный «теплосъем» на конденсаторе достигается при применении фреона R32 (на 3,7 % больше, чем при применении R152a).

Наименьшее энергопотребление может быть достигнуто при использовании хладагента R152a. Оно будет меньше примерно на 8 % чем при применении R410a. При проектировании установок следует учитывать более высокую металлоемкость и меньшую величину нагрева воздуха в конденсаторе для фреона R152a, которую

необходимо компенсировать с помощью резервного источника теплоты. Поэтому при выборе рабочего тела для встраиваемого ТН в приточно-вытяжной установке необходимо проводить комплексное моделирование с учетом работы всех элементов вентиляционного агрегата.

Выводы. Анализ влияния применяемого рабочего тела на эксплуатационные характеристики встраиваемого воздушного теплового насоса показал:

- хладагент R32 позволяет добиться большей величины нагрева воздуха в конденсаторе;
- ТН, работающий на хладагенте R152a, имеет коэффициент преобразования энергии выше на 6–8 % по сравнению с другими рассмотренными хладагентами;
- хладагенты R32 и R410a, обладающие лучшими удельными объемными характеристиками, больше подходят в роли рабочих тел для встраиваемого холодильного оборудования, благодаря меньшей металлоемкости теплового насоса;
- применение ТН в приточно-вытяжных установках с утилизаторами теплоты (пластинчатыми рекуперативными, роторными регенеративными, с промежуточным теплоносителем) систем вентиляции и кондиционирования воздуха характеризуется относительно небольшой степенью сжатия хладагентов R410a, R32 и R22, что позволяет применять его в условиях одноступенчатого сжатия;
- в регионах с экстремально низкими температурами предпочтительны хладагенты R410a и R32;
- встраиваемый воздушный ТН показал высокие значения коэффициента преобразования энергии со всеми рассматриваемыми хладагентами, что доказывает высокую эффективность такого направления применения холодильного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолов С.И. Использование тепловых насосов для объектов наземной инфраструктуры районов крайнего севера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №2. С. 497–499. DOI 10.24412/2071-6168-2024-2-497-498
2. Реев В.Г., Утум Д.С.Г. Расчет цикла теплового насоса при различных источниках низкопотенциального тепла в условиях Арктики Республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2023. Т. 20, № 2. С. 25–34. DOI: 10.25587/SVFU.2023.66.41.003

3. Аверьянов В.К., Уляшева, В.М., Киборт И.Д. Анализ результатов моделирования одно и двухконтурного воздушного теплового насоса // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3(44). С. 164–167.
4. Киборт И.Д. Сравнительный анализ результатов моделирования теплоутилизационного теплового насоса и классических утилизаторов тепловой энергии удаляемого воздуха // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 157–162.
5. Яковлев И.В., Исхакова А.М. Эффективность применения тепловых насосов типа “воздух–вода” в климатических условиях России // Теплоэнергетика. 2020. № 10. С. 38–47. DOI 10.1134/S0040363620100100
6. Гречихин Л.И. Тепловые насосы в авиации // Военно-технический вестник. 2013. Т. 61, № 2. С. 37–54. DOI 10.5937/vojteh61-3538
7. Лунева С.К. Эффективность применения тепловых насосов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2015. № 3(33). С. 59–62.
8. Филатов С.О., Володин В.И. Метод расчета и анализ совместной работы контура циркуляции грунтовых теплообменников и теплового насоса // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 2013. №3. С. 161–166.
9. Ильина Т.Н., Орлов П.А., Саввин Н.Ю., Елистратова Ю.В. Теплообменники процессы в испарительном блоке воздушного теплового насоса // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-36-44
10. Володин В.И., Кунтыш В.Б., Филатов С.О. Энергетическая эффективность теплового насоса "воздух - воздух" // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 2015. № 3(176). С. 145–151.
11. Пухкал В.А., Петров М.М. Утилизация теплоты в приточно-вытяжных установках с тепловым насосом. // В сборнике: Эффективность инженерных систем и энергосбережение. Сборник статей международной научно-практической конференции. Брест. Издательство БрГТУ. 2023. С. 92–100.
12. Пухкал В.А., Петров М.М. Энергоэффективность приточно-вытяжных установок со встроенным тепловым насосом // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № S1. С. 294–299.
13. Здитовецкая С.В., Володин В.И. Утилизация теплоты в системе приточно-вытяжной вентиляции с использованием теплового насоса // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 2009. Т. 1, № 3. С. 171–173.
14. Пухкал В.А., Петров М.М., Анисимов С.М., Цыганков А.В. Экспериментальное исследование теплового насоса // Вестник гражданских инженеров. 2025. №1 (108). С. 92–100.
15. Свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ № 2025689712 Российская Федерация. HeatPumpАН : № 2025689712 ; заявл. 28.08.2025 ; зарегистр. 30.10.2025; опубл. 30.10.2025 / Петров М.М., Пухкал В.А. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». 1 с.
16. Рэй Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
17. Кошкин Н.Н., Стукаленко А.К., Бухарин Н.Н. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. 464 с.
18. Богословский В.Н. Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 319 с.
19. Пиир А.Э., Козак О.А., Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б. Тепловой расчет пластинчатых рекуператоров для систем вентиляции // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 2(210). С. 236–243.
20. Бялый Б.И. Теплообменное оборудование воздухообрабатывающих установок ООО «ВЕЗА». М.: Инфорт, 2005. 278 с.
21. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П. Теплообменные аппараты холодильных установок. Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
22. Кошкин Н.Н., Сакун И.А., Бамбушек Е. М. Холодильные машины : учебное пособие. Л.: Машиностроение, 1985. 510 с.
23. Володин В. И., Седляр К.В. Выбор эксплуатационных параметров и хладагента для парокompрессорных воздушных тепловых насосов // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 2016. № 3(185). С. 147–153.
24. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант», 2006. 712 с.

Информация об авторах

Петров Михаил Михайлович, аспирант кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: michaelpetrov1998@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Поступила 17.08.2025 г.

© Петров М.М., 2026

Petrov M.M.

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: michaelpetrov1998@yandex.ru

THE INFLUENCE OF REFRIGERANT ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AN AIR HEAT PUMP IN AIR HANDLING UNITS

Abstract. The article examines the dependencies describing the influence of the working fluid of a vapor-compression air heat pump (HP) integrated into supply and exhaust ventilation units on its operational characteristics (energy conversion ratio, air heating value, specific volumetric heat capacity, maximum absolute pressure in the refrigeration circuit elements, electrical power consumed by the compressor drive, and compression ratio). The dependencies of approximating curves describing the enthalpy and entropy of refrigerants R22, R32, R134a, R152a, and R410a in the superheated vapor region are presented.

For the analysis of integrated heat pump characteristics, the refrigerants R134a, R22, R32, R152a, and R410a were selected. It has been established that refrigerants R32 and R410a are the most favorable for use in an integrated HP due to their relatively high specific heat capacity, which results in lower metal consumption of refrigeration equipment under the constrained conditions of ventilation units. Refrigerants R134a and R152a are characterized by a high compression ratio compared to other freons. Their use in the HP of a supply and exhaust unit configuration with the heat pump evaporator located after the heat recovery unit in the direction of exhaust air requires the organization of two-stage compression under extremely low air temperatures.

Keywords: ventilation, air handling units, air heat pump, refrigerant

REFERENCES

1. Bogomolov S.I. Use of heat pumps for ground infrastructure facilities in the Far North regions [Ispolzovanie teplovykh nasosov dlya ob"ektov nazemnoi infrastruktury raionov kraynнего severa]. News of Tula State University. Technical Sciences. 2024. No. 2. Pp. 497–499. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-497-498. (rus)
2. Reev V.G., Utum D.S.G. Calculation of heat pump cycle with different low-grade heat sources in Arctic conditions of the Sakha Republic (Yakutia) [Raschet tsikla teplovogo nasosa pri razlichnykh istochnikakh nizkopotentsial'nogo tepla v usloviyakh Arktiki Respubliki Sakha (Yakutiya)]. Bulletin of the North-Eastern Federal University. 2023. Vol. 20. No. 2. Pp. 25–34. DOI: 10.25587/SVFU.2023.66.41.003. (rus)
3. Averyanov V.K., Ulyasheva V.M., Kibort I.D. Analysis of simulation results for single and dual-circuit air-source heat pumps [Analiz rezultatov modelirovaniya odno i dvukhkонтурного vozdushnogo teplovogo nasosa]. Bulletin of Civil Engineers. 2014. No. 3(44). Pp. 164–167. (rus)
4. Kibort I.D. Comparative analysis of simulation results for heat recovery heat pumps and classical exhaust air heat recuperators [Sravnitel'nyy analiz rezultatov modelirovaniya teploutilizatsionnogo teplovogo nasosa i klassicheskikh utilizatorov teplovoy energii udalyaemogo vozdukhа]. Bulletin of Civil Engineers. 2015. No. 6(53). Pp. 157–162. (rus)
5. Yakovlev I.V., Iskhakova A.M. Efficiency of air-to-water heat pumps in Russian climatic conditions [Effektivnost' primeneniya teplovykh nasosov tipа «vozdukh–voda» v klimaticheskikh usloviyakh Rossii]. Thermal Engineering. 2020. No. 10. Pp. 38–47. DOI: 10.1134/S0040363620100100. (rus)
6. Grechikhin L.I. Heat pumps in aviation [Teplovye nasosy v aviatsii]. Military Technical Courier. 2013. Vol. 61. No. 2. Pp. 37–54. DOI: 10.5937/vojtehg61-3538. (rus)
7. Luneva S.K. Efficiency of heat pump applications [Effektivnost' primeneniya teplovykh nasosov]. Technical and Technological Problems of Service. 2015. No. 3(33). Pp. 59–62. (rus)
8. Filatov S.O., Volodin V.I. Calculation method and analysis of cooperative operation between ground heat exchanger circuits and heat pumps [Metod rascheta i analiz sovместnoy raboty kontura tsirkulyatsii gruntovykh teploobmennikov i teplovogo nasosa]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 2013. No. 3. Pp. 161–166. (rus)
9. Ilina T.N., Orlov P.A., Savvin N.Yu., Elistratova Yu.V. Heat and mass transfer processes in the evaporator unit of an air-source heat pump [Teplo- i massoperecheniya v isparitel'nom bloke vozdushnogo teplovogo nasosa]. Bulletin of BSTU

named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 36–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-36-44. (rus)

10. Volodin V.I., Kuntyshev V.B., Filatov S.O. Energy efficiency of air-to-air heat pumps [Energeticheskaya effektivnost' teplovogo nasosa «vozdukh–vozdukh»]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 2015. No. 3(176). Pp. 145–151. (rus)

11. Pukhkal V.A., Petrov M.M. Heat recovery in ventilation systems with heat pumps [Utilizatsiya teploty v pritochno-vytyazhnykh ustanovkakh s teplovym nasosom]. In the collection: Efficiency of engineering systems and energy saving. A collection of papers from the international scientific and practical conference. 2023. Pp. 92–100. (rus)

12. Pukhkal V.A., Petrov M.M. Energy efficiency of ventilation units with integrated heat pumps [Energoeffektivnost' pritochno-vytyazhnykh ustanovok so vstroennym teplovym nasosom]. Construction and industrial safety. 2023. No. S1. Pp. 294–299. (rus)

13. Zditovetskaya S.V., Volodin V.I. Heat recovery in ventilation systems using heat pumps [Utilizatsiya teploty v sisteme pritochno-vytyazhnoy ventilyatsii s ispol'zovaniem teplovogo nasosa]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 2009. Vol. 1. No. 3. Pp. 171–173.

14. Pukhkal V.A., Petrov M.M., Anisimov S.M., Tsygankov A.V. Experimental study of heat pumps [Eksperimental'noe issledovanie teplovogo nasosa]. Bulletin of Civil Engineers. 2025. No. 1(108). Pp. 92–100. (rus)

15. Petrov M.M., Pukhkal V.A. HeatPumpAH. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2025689712, 2025. 1 p.

16. Reay D., Macmichael D. Heat Pumps [Teplovye nasosy]. M.: Energoizdat. 1982. 224 p. (rus)

17. Koshkin N.N., Stukalenko A.K., Bukharin N.N. Thermal and structural calculations of refrigeration machines [Teplovye i konstruktivnye raschyoty kholodil'nykh mashin]. L.: Mashinostroenie. 1976. 464 p. (rus)

18. Bogoslovskiy V.N. Thermal Physics of Heat Recovery Apparatuses for Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems [Teplofizika apparatov utilizatsii tepla sistem otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozduha]. M.: Stroyizdat. 1983. 319 p. (rus)

19. Piir A.E., Kozak O.A., Kuntyshev V.B., Sukhotskiy A.B. Thermal Calculation of Plate Recuperators for Ventilation Systems [Teplovoy raschet plastinchatykh rekuperatorov dlya sistem ventilyatsii]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 1. Forestry, environmental management and processing of renewable resources. 2018. No. 2 (210). Pp. 236–243. (rus)

20. Byaly B.I. Heat and mass exchange equipment for air handling units by VESA LLC [Teplo- i massoobmennoe oborudovanie vozdukhooobrabatывayushchikh ustanovok OOO «VEZA»]. M.: Infort. 2005. 278 p. (rus)

21. Danilova G.N., Bogdanov S.N., Ivanov O.P. Heat exchangers for refrigeration systems [Teploobmennyye apparaty kholodil'nykh ustanovok]. L.: Mashinostroenie. 1986. 303 p. (rus)

22. Koshkin N.N., Sakun I.A., Bambushek, E.M. Refrigeration machines [Kholodil'nyye mashiny]. L.: Mashinostroenie. 1985. 510 p. (rus)

23. Volodin V.I., Sedlyar K.V. Selection of operational parameters and refrigerants for air-source vapor-compression heat pumps [Vybor ekspluatatsionnykh parametrov i khladagenta dlya parokompressornykh vozduzhnykh teplovykh nasosov]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 2016. No. 3(185). Pp. 147–153. (rus)

24. Morozyuk T.V. Theory of refrigeration machines and heat pumps [Teoriya kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov]. Odessa: Studio “Negotsiant”. 2006. 712 p. (rus)

Information about the authors

Petrov, Mikhail M. Postgraduate student. E-mail: michaelpetrov1998@yandex.ru. St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 4.

Received 17.08.2025

Для цитирования:

Петров М.М. Влияние хладагента на эксплуатационные показатели воздушного теплового насоса приточно-вытяжной вентиляционной установки // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 32–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-32-43

For citation:

Petrov M.M. The influence of refrigerant on the performance characteristics of an air heat pump in air handling units. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 32–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-32-43

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-44-52

Ткач Л.В., Гольцов А.Б., Михайлов А.И., Шалпегин Д.С.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: koryaka_90@mail.ru.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШИБЕРНЫХ ЗАДВИЖЕК В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ И АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная и практически значимая проблема повышения эффективности работы систем вентиляции и аспирации. Особое внимание уделяется методам управления воздушным потоком с помощью различных регулирующих устройств, и в частности – шиберных задвижек, которые широко применяются в промышленном и бытовом секторах.

Основная цель проведённого исследования заключается в создании и критическом анализе адекватной CFD модели шиберной задвижки, при этом в качестве программного обеспечения выбран мощный комплекс SolidWorks, позволяющий реализовать как геометрическое моделирование, так и последующий численный расчёт. В процессе выполнения работы была построена детальная компьютерная модель шиберной задвижки, проведено исследование зависимости коэффициента местного сопротивления (ζ) от площади проходного сечения, а также выполнен сравнительный анализ полученных численных результатов с данными, приведёнными в справочных источниках. Полученные результаты численного эксперимента продемонстрировали высокую точность предсказаний и надёжность построенной модели, что подтверждается небольшими отклонениями от справочных значений.

На основании проведённого анализа было установлено, что разработанная CFD модель шиберного устройства может стать надёжной основой для дальнейших исследований, оптимизаций и совершенствований вентиляционных и аспирационных систем. Применение программных продуктов, таких как SolidWorks, существенно упрощает и ускоряет процесс проектирования, моделирования и последующего анализа характеристик вентиляции. Полученные данные могут оказать практическую значимость на различных производствах, где эффективное управление воздушным потоком имеет критическое значение для обеспечения комфортного микроклимата и энергоэффективности.

Ключевые слова: вентиляция, аспирация, износ, шиберная задвижка, CFD модель, численный эксперимент

Введение. На множестве производств, от деревообработки и мебельного производства до горнодобывающей и пищевой промышленности, а также в сферах транспортировки сыпучих грузов, машиностроения и металлообработки, текущие технологические процессы создают серьезные экологические проблемы. Они сопровождаются интенсивным тепловыделением, образованием опасной мелкодисперсной пыли и выбросами вредных газов, что приводит к загрязнению как рабочих зон, так и окружающей среды. [1]. Локализация загрязнений осуществляется с помощью систем вентиляции и аспирации, которые требуются для соблюдения санитарных норм чистоты воздуха и обеспечения безопасной и комфортной рабочей среды.

Ключевым элементом эффективной работы систем вентиляции и аспирации является управление воздушным потоком. Точная регулировка позволяет оптимизировать работу системы, снизить энергопотребление, а также обеспечить комфортный микроклимат в помещении.

Существующие методы регулирования расхода воздуха: использование регулирующих устройств, изменение производительности вентилятора, использование автоматических систем

управления. Каждый из методов имеет, как плюсы, так и недостатки в использовании [2, 3].

Рассмотрим более подробно применение регулирующих устройств, которые в вентиляционных и аспирационных системах играют роль не просто компонентов, а интеллектуальных элементов управления. Они обеспечивают автоматическую адаптацию параметров работы системы к текущим потребностям и внешним условиям. Правильный выбор и настройка регулирующих устройств – это залог эффективной и безопасной работы систем. При выборе устройств необходимо учитывать характеристики данных систем, требования к микроклимату и условия эксплуатации.

Качество работы этих систем во многом определяется правильным выбором и настройкой данных устройств [4, 5]. Регулирующие устройства отличаются высокой эффективностью и автономностью, не требуя подключения к сети [6]. Но известны также рекомендации [7, 8] о нецелесообразности применения регулирующих устройств в системах аспирации.

Основные эксплуатационные риски, связанные с применением регулирующих устройств в системах вентиляции и аспирации, включают в

себя загрязнение пылью, приводящее к снижению пропускной способности, и абразивный износ, сокращающий срок службы оборудования [9–11].

Для снижения загрязнения пылью регулирующих устройств используют следующие методы: предварительная фильтрация, использование адгезионных покрытий для нанесения на поверхность устройств, управление воздушными потоками, оптимизация конструкции регуляторов, применение автоматической очистки.

Снижение абразивного износа регулирующих устройств в системах вентиляции и аспирации достигается за счет использования материалов, устойчивых к абразивному износу, разработки и внедрения конструктивных решений, снижающих скорость потока в зонах максимального износа, использования специальных защитных элементов в устройствах, настройки оптимальных параметров работы, применения специальных добавок для материалов, позволяющих снизить их абразивные свойства [12].

Но, как показывает практика при использовании регулирующих устройств, этих мер недостаточно и необходим комплексный подход. Следовательно, актуальной задачей является поиск новых технических решений, направленный на снижение негативного воздействия от использования регулирующих устройств и актуализации их применения в системах аспирации с учетом развития технологических процессов.

В современном мире для решения сложных задач в различных сферах деятельности, в том числе в вентиляции и аспирации, используются программные продукты, которые позволяют моделировать воздушные потоки, рассчитывать аэродинамические характеристики сети воздуховодов, подбирать оптимальное оборудование и оценивать энергоэффективность системы. Это, в свою очередь, приводит к существенному сокращению времени, затрачиваемого на проектирование, снижению вероятности ошибок и повышению общей надежности спроектированной системы.

Для расчетов, связанных с системой вентиляции и аспирации, часто используются методы CFD-моделирования, предназначенные для автоматизации процессов на этапах конструкторской и технологической подготовки, позволяющие разрабатывать вентиляционные и аспирационные изделия различной сложности и конфигурации. CFD-моделирование позволяет заменять дорогостоящие эксперименты математическими расчетами, сокращая сроки и стоимость проектирования, а также оптимизировать конструкции на этапе разработки, избегая дорогостоящих оши-

бок. Особую ценность CFD-моделирование представляет при создании новых конструкций устройств, где отсутствуют экспериментальные данные и требуется детальное понимание поведение жидкостей и газов. Особое внимание при создании CFD-моделей следует обращать на создание адекватных моделей способных с минимальной погрешностью описать происходящий в разрабатываемом устройстве процесс [13–15].

В данной статье рассмотрен расчет регулирующего устройства (шиберной задвижки) в программном комплексе SolidWorks, с целью сравнения расчетного коэффициента местного сопротивления шиберной задвижки со справочными данными, что позволит разработать адекватную CFD модель для дальнейшего исследования и совершенствования регулирующих устройств в системах аспирации. С помощью данного программного комплекса возможно изменять параметры модели на различных стадиях разработки, а также проверять модель на прочность, устойчивость, абразивность, моделировать движение воздушного потока.

Материалы и методы. В работе применялся анализ теоретических предпосылок регулирования и компьютерное CFD-моделирование в среде SolidWorks.

В рамках фундаментальных исследований процессов регулирования параметров в вентиляционно-аспирационных системах сформирована комплексная теоретическая база, описывающая закономерности влияния регулирующей арматуры на функциональные характеристики данных систем.

Физико-механический аспект регулирования воздушных потоков в воздухораспределительных каналах базируется на принципе преобразования площади поперечного сечения проходного канала. При этом наблюдается закономерное возрастание гидравлического сопротивления системы, сопровождающееся снижением давления воздушного потока.

Теоретическая модель регулирования позволяет количественно оценить влияние регулирующих устройств на аэродинамические характеристики вентиляционных систем и прогнозировать изменения параметров воздушного потока при различных режимах работы.

Потери давления в регулирующих устройствах обусловлены перестройкой полей скоростей сопровождающегося образованием на границах потоков вихрей. Изменение поля скоростей и поддержание вращения вихрей требуют затрат энергии, поэтому течение через регулирующие устройства, обладающие местным сопротивлением, всегда сопровождаются потерями давления. При установке регулирующих элементов в

системе вентиляции и аспирации происходит локальное снижение давления воздуха. Это вызывает деформацию профиля скоростей воздушного потока и формирование вихревых зон в пристеночной области воздуховода, что влечет за собой диссипацию энергии. Величина потерь давления на местном сопротивлении (ΔP) пропорциональна динамическому давлению воздушного потока.

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

Потери давления на местном сопротивлении зависят от коэффициента (ζ), характеризующего потери энергии потока воздуха, вызванные местными изменениями геометрии системы, плотности (ρ) и скорости (v) воздуха.

Коэффициент местного сопротивления (ζ) представляет собой отношение потери давления в местном сопротивлении (ΔP) к динамическому давлению потока ($\frac{\rho v^2}{2}$) и является функцией от геометрических размеров сечения (диаметра D для круглых воздухопроводов, B , A для прямоугольного воздуховода) и числа Рейнольдса (Re).

$$\zeta = \Delta P / \frac{\rho v^2}{2} = f(D; B; A; Re) \quad (2)$$

Значения ζ варьируются в широком диапазоне в зависимости от геометрии и типа местного сопротивления [16].

Коэффициент сопротивления регулирующих и запорных устройств определяется их конструктивными особенностями, влияющими на характер потока (например, прямолинейность, стабильность сечения). Шероховатость внутренней поверхности также оказывает значительное влияние на коэффициент сопротивления.

Длина регулирующих клапанов и задвижек связана с размером их проходного сечения, что приводит к нарушению геометрического подобия при изменении диаметра прохода. Коэффициент сопротивления гидравлической системы,

использующей эти клапаны, зависит от диаметра прохода: для больших диаметров он увеличивается с ростом диаметра, а для малых размеров увеличивается с уменьшением диаметра. Характер сопротивления запорного устройства напрямую коррелирует с углом или степенью открытия его запорного органа [16].

В справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика приведены данные значения гидравлического сопротивления для шиберов в зависимости от глубины погружения плунжера (в круглом воздуховоде) [16].

Цель исследования: создание адекватной CFD модели шиберной задвижки для дальнейшего исследования и совершенствований регулирующих устройств.

Ставились следующие задачи исследования:

- разработать CFD модель шиберной задвижки;
- проведение серии вычислительных экспериментов при различных скоростях к нормали для определения зависимости ζ от глубины погружения плунжера (H/D_0);
- сравнить полученные данные в программе SolidWorks со справочными данными И.Е. Идельчика.

В среде SolidWorks была построена модель круглого воздуховода с шибером ($D_0=25$ мм). Задавались следующие граничные условия: на входе – давление $P=101325$ Па, температура $t=20$ °С, на выходе: скорость $V=10$ – 20 м/с. Отношение H/D_0 (глубина погружения плунжера) от 0,15 до 0,95. Данный программный комплекс, за счет автоматизации расчетов, значительно снижает трудозатраты в исследовательском процессе. Многочисленные работы [17–19], использующие этот комплекс, доказывают его практическую ценность и надежность. На рис.1 представлен общий вид расчетной модели.

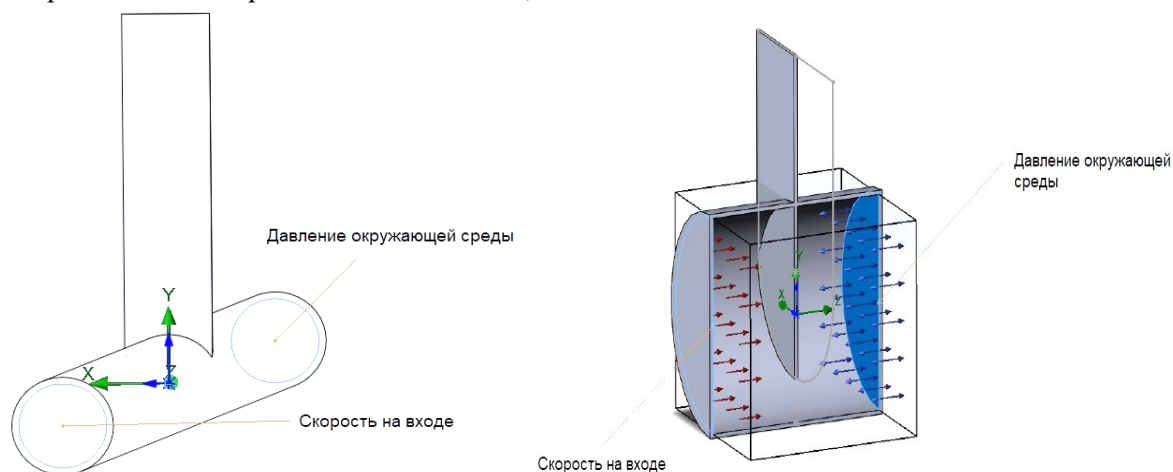


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Сопротивление, оказываемое шибером во многом аналогично физическим процессам, происходящим при работе диафрагменных устройств. В обоих случаях мы сталкиваемся с явлением резкого изменения геометрии проходного сечения для текущей среды – будь то газ, жидкость или даже суспензия. Когда поток жидкости или газа проходит через узкое отверстие шибера или диафрагмы, он подвергается внезапному сжатию, а затем, пройдя это препятствие, – резкому расширению. Этот цикл сжатия-расширения неизбежно порождает ряд сложных гидродинамических эффектов.

Особое внимание следует уделить формированию сложного изгибания потока. Вместо плавного обтекания преграды, поток приобретает характер турбулентности, характеризующейся хаотичными движениями частиц. Эта турбулентность возникает вследствие сочетания двух основных факторов: локального ускорения потока и его отрыва от поверхности ограничивающего элемента (шибера или диафрагмы). Во время прохождения через сужение поток вынужден ускоряться, чтобы сохранить массовый расход. Однако эта высокая скорость часто приводит к потере устойчивости ламинарного слоя и переходу в турбулентное движение. Отрыв потока от поверхности шибера происходит из-за того, что поток не может мгновенно адаптироваться к изменяющейся геометрии канала, что приводит к образованию зон застоя и отслоения.

Эти зоны застоя и отрыва являются источником образования вихрей – вращающихся областей жидкости или газа. Вихри потребляют энергию потока, трансформируя ее в кинетическую энергию вращения, тем самым увеличивая потери энергии на трение и турбулизацию. Количество образуемых вихрей и их размер зависят от скорости потока, свойств среды (вязкость, плотность) и формы шибера. Например, острые углы на поверхности шибера будут способствовать более интенсивному образованию вихрей по сравнению с гладкими скругленными поверхностями. Все эти факторы в совокупности значительно увеличивают общее сопротивление, оказываемое шиберным устройством протекающей среде [20].

Для проведения вычислительного эксперимента использовалось программное обеспечение Solidworks. Математическая модель базировалась на уравнениях неразрывности движения, замыкание которых было выполнено с помощью $k-\epsilon$ модели турбулентности (интенсивность 0,1 %, масштаб 0,002 м). Решение уравнений осуществлялось на адаптивных прямоугольных сетках, структура которых была оптимизирована под геометрию исследуемого объекта. В ходе вычис-

лительного эксперимента осуществлялась верификация расчетной сетки и валидация результатов справочных данных и вычислительного эксперимента. Верификация расчетной сетки заключается в её подборе при дискретизации объектов и осуществлялась в следующей последовательности: построение и выбор математической модели, выбор контрольных параметров (ζ , H/D_0), выбор начальной сетки, моделирование с последующим измельчением расчетной сетки, анализ полученных результатов, выявление уровня адаптации сетки, при котором оказывается незначительное влияние на контрольные параметры [21, 22]. При валидации проводилось сопоставление полученных значений ζ от H/D_0 (при различных скоростях) в результате численного эксперимента с результатами справочных данных. Точность снятия показаний (давление, скорость и др.) достигалась за счет удлинения воздуховода, что в свою очередь снижает неравномерность течения потока. Исследование проводилось при $Re > 10^4$.

Проведенная серия вычислительных экспериментов при различных скоростях к нормали (диапазон 10–20 м/с) для определения зависимости ζ от глубины погружения шибера (h/D_0) показала высокую достоверность полученных результатов, коэффициент корреляции для всех экспериментов колеблется в диапазоне $r=0,95...0,98$ и коэффициент детерминации $r^2=0,89...0,96$, критерий Фишера меньше критических значений, значимость $p < 0,05$. Наблюдается хорошее совпадение полученных данных с теоретическими кривыми Идельчика, что подтверждает правильность построения модели и обоснованность сделанных предположений.

Критерий сходимости расчетов был достигнут за счет достижения стабильного значения разности давлений с изменением между итерациями, меньшим заданного порога (по относительной ошибке), что свидетельствовало о том, что расчетная область потока достигла установившегося режима.

На рис.2 представлены результаты экспериментальных исследований по [16] и по данным проведенного численного эксперимента.

Выводы. В статье рассмотрена необходимость оптимизации функционирования систем вентиляции и аспирации, с особым вниманием к управлению воздушными потоками посредством регулирующих устройств, в частности, шиберных задвижек. Основной целью исследования является разработка и верификация адекватной вычислительной гидродинамической (CFD) модели

шиберной задвижки с применением программного комплекса SolidWorks. В рамках проведенной работы была осуществлена генерация трехмерной компьютерной модели шиберной задвижки. Была исследована зависимость коэффициента местного сопротивления (ζ) от площади проходного сечения, а также проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными из справочных источников. Результаты численного моделирования подтвердили высокую степень точности и надежности разработанной модели. Установлено, что созданная CFD-модель шиберного устройства может служить ос-

новой для дальнейших научно-исследовательских работ и инженерных усовершенствований. Применение специализированных программных продуктов, таких как SolidWorks, существенно снижает трудоемкость и временные затраты на этапах проектирования и анализа вентиляционных систем. Полученные эмпирические данные обладают потенциальной практической значимостью для различных производственных объектов, где эффективное регулирование воздушных потоков является критически важным для обеспечения комфортных условий микроклимата и достижения эффективности.

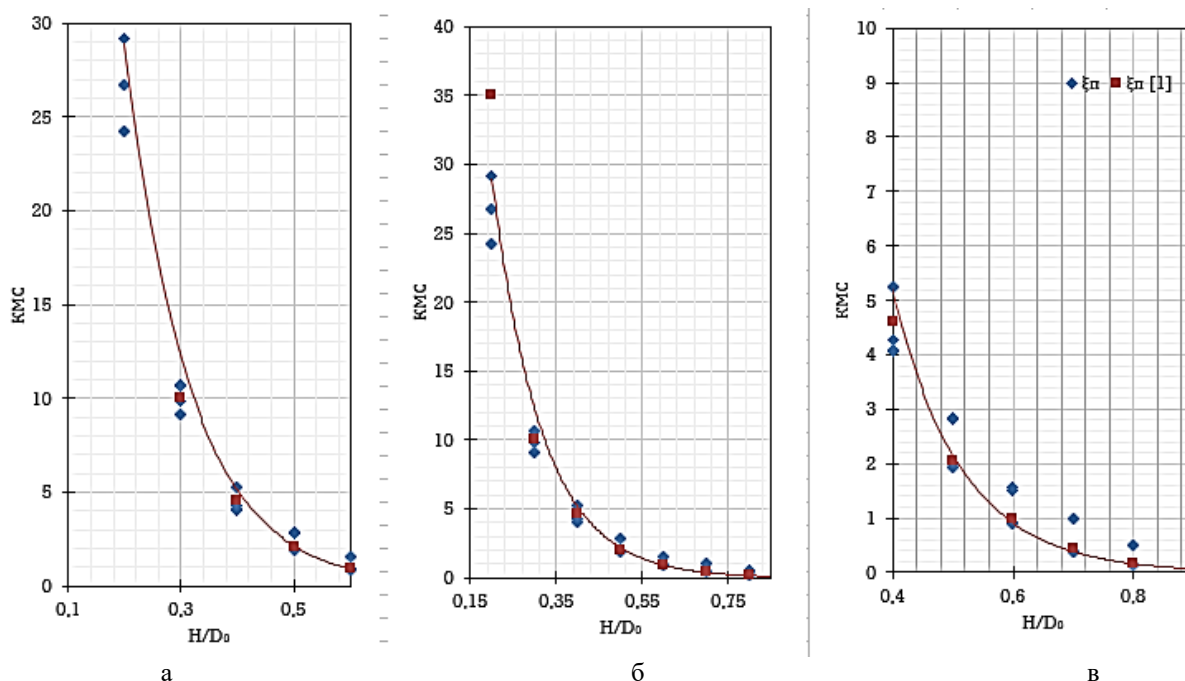


Рис. 2. График зависимости коэффициента КМС от H/D_0
а) $H/D_0=0,1 \dots 0,6$, б) $H/D_0=0,15 \dots 0,75$, в) $H/D_0=0,4 \dots 0,8$

ξ_p – Значение по формуле И.Е. Идельчика;
 $\xi_p[1]$ – Результаты численного эксперимента

Основываясь на всестороннем анализе результатов проведенного численного эксперимента, а также учитывая полученные данные о соответствии со справочными значениями, допустимо сделать следующие выводы:

- зависимость сопротивления шибера при увеличении глубины погружения шибера имеет экспоненциальную зависимость, в данном случае увеличение глубины погружения шибера ведет к ускоренному росту сопротивления вследствие уменьшения эффективного сечения трубы и увеличения турбулентности течения;
- разработана адекватная численная CFD-модель регулирующего устройства, которая позволит проводить дальнейшие эксперименты, направленные на совершенствование процесса регулирования в системах аспирации. Модель

позволит провести виртуальные испытания, оценить влияние конструктивных изменений на аэродинамические характеристики системы и выявить оптимальные режимы эксплуатации оборудования.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткач Л.В. К вопросу проектирования систем аспирации и роли регуляторов расхода в них // Наука молодых - будущее России: Сборник научных статей 9-й Международной научной

конференции перспективных разработок молодых ученых. В 5-ти томах, Курск, 12–13 декабря 2024 года. Курск: ЗАО "Университетская книга". 2024. С. 265–270.

2. Ткач Л.В., Уваров А.В., Михайлов А.И. Классификация регуляторов расхода воздуха в системах промышленной вентиляции и аспирации // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVI Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2024 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2024. С. 54–58.

3. Федоренко И.Я., Капустин В.Н. Классификация регуляторов расхода воздуха для систем вентиляции по конструктивному исполнению регулирующих элементов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 8(58). С. 69–73.

4. Гольцов А.Б. Выявление факторов, влияющих на равномерность всасывания аспирационными воронками // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 19–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-19-31.

5. Gol'tsov A.B., Logachev K.I., Ovsyannikov Y.G., Kireev V.M. Numerical Simulation of Air Flows in the Loading Chute of an Aspiration Shelter with Multistage Recirculation Air Seal // Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 61, №6. Pp. 727–734. DOI: 10.1007/s11148-021-00550-3.

6. Олексюк К.М. Олексюк Кирилл Михайлович регуляторы расхода постоянного и переменного потока воздуха // Вестник магистратуры. 2024. № 3-2(150). С. 20–21.

7. Петров С.А., Иванова М.В. Оценка эффективности использования регулирующих устройств в системах аспирации предприятий. // Вестник промышленной экологии. 2018. №4. С. 45–52.

8. Сидоров Д. Е. Нецелесообразность применения регулирующих устройств в аспирационных системах // Промышленная экология. 2021. № 3. С. 45–52.

9. Семичева Н.Е., Ежов В.С., Бурцев А.П. Инновационные энергосберегающие технические решения в системах вентиляции и кондиционирования воздуха // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1(64). С. 109–114.

10. Волков В.А. Регуляторы расхода воздуха VAV – основа системы кондиционирования с переменным расходом воздуха // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2011. № 4. С. 38–41.

11. Logachev K.I., Puzanok A.I., Zorya V.U.

Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker // Proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006. Egmond aan Zee. The Netherlands. 2006. 11 p.

12. Ткач Л.В. Абразивный износ регулирующих устройств в системах аспирации: проблемы и решения // Наука и практика: актуальные вопросы, достижения и инновации : Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 августа 2025 года Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). 2025. С. 44–47.

13. Зиганшин А.М., Бадыкова Л.Н. Численное моделирование течения в профилированном вентиляционном тройнике на слияние // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 6(702). С. 41–48.

14. Бородин А.А. Расчет аэродинамических параметров вентиляционной сети // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2021. № 4. С. 58–61.

15. Tian B., Kubota Y., Murata M. Research on the relationship between the centerline velocity, aspect ratio and exhaust airflow rate for a slot and a rectangular capture hood in an local exhaust ventilation system // Ind Health. 2023. Vol. 61, No. 3. Pp. 222–231. DOI: 10.2486/indhealth.2022-0045.

16. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлически сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. С. 428–468.

17. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Семенов А.С., Киреев В.М., Елистратова Ю.В., Серых И.Р., Чернышева Е.В. Выравнивание потоков в аспирационных патрубках // Экология промышленного производства. 2024. № 2(126). С. 46–57. DOI 10.52190/2073-2589_2024_2_46.

18. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Аверкова О.А., Елистратова Ю.В., Семенов А.С. Численное моделирование воздушного потока в аспирационной воронке с выравнивающим устройством // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 7(787). С. 64–75. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-787-7-64-75.

19. Арбатский А.А., Глазов В.С. Расчет систем вентиляции производственных и общественных зданий с применением средств CFD-моделирования // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ-2017» (Москва, 11–12 октября 2017 г.). М.: ФГБОУ ВПО МГУДТ. 2017. С. 176–180.

20. Муфтахов В.З. Расчетно-теоретическое

и экспериментальное исследования кавитационных характеристик шиберных запорно-регулирующих устройств с внутренним байпасом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 7(760). С. 84–92. DOI 10.18698/0536-1044-2023-7-84-92.

21. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург: Изд-во Химиздат, 2005. 659 с.

22. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1979. 295 с.

Информация об авторах

Ткач Людмила Владимировна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: koryaka_90@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гольцов Александр Борисович, доктор технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: abgolcov@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Михайлов Александр Игоревич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: mihaylov.bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шалпегин Даниил Сергеевич, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: danshalp25@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.11.2025 г.

© Ткач Л.В., Гольцов А.Б., Михайлов А.И., Шалпегин Д.С., 2026

**Tkach L.V., Goltsev A.B., Mikhailov A.I., Shalpegin D.S.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
E-mail: koryaka_90@mail.ru

RESEARCH OF LOCAL RESISTANCE OF SLIDING DOORS IN VENTILATION AND ASPIRATION SYSTEMS

Abstract. The article discusses the relevant and practically significant problem of improving the efficiency of ventilation and aspiration systems. Special attention is paid to the methods of controlling the air flow using various regulating devices, and in particular, slide gates, which are widely used in the industrial and domestic sectors.

The main purpose of the conducted research is to create and critically analyze an adequate CFD model of a slide gate, while using the powerful SolidWorks software package to implement both geometric modeling and subsequent numerical calculations. During the research, a detailed computer model of a slide gate was created, and the dependence of the local resistance coefficient (ζ) on the flow area was studied. The obtained numerical results were compared with data from reference sources. The results of the numerical experiment demonstrated high accuracy of the predictions and the reliability of the constructed model, which is confirmed by small deviations from the reference values.

Based on the analysis conducted, it was determined that the developed CFD model of the slide device can serve as a reliable foundation for further research, optimization, and improvement of ventilation and aspiration systems. The use of software products such as SolidWorks significantly simplifies and accelerates the process of designing, modeling, and analyzing ventilation characteristics. The obtained data can have practical significance in various industries where efficient airflow management is crucial for ensuring a comfortable microclimate and energy efficiency.

Keywords: ventilation, aspiration, wear and tear, slide gate, CFD model, numerical experiment.

REFERENCES

1. Tkach L.V. On the Design of Aspiring Systems and the Role of Flow Regulators in Them [K voprosu proektirovaniya sistem aspiracii i roli reg-

ulyatorov raskhoda v nih]. Nauka molodyh - budushchee Rossii: Sbornik nauchnyh statej 9-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii perspektivnyh razrabotok molodyh uchenyh. V 5-ti tomah, Kursk, 12–13 dekabrya 2024 goda. Kursk: ZAO "Universitetskaya kniga". 2024. Pp. 265–270. (rus)

2. Tkach L.V., Uvarov A.V., Mikhailov A.I. Classification of Air Flow Regulators in Industrial Ventilation and Aspirating Systems [Klassifikatsiya regulyatorov raskhoda vozduha v sistemah promyshlennoj ventilyatsii i aspiratsii]. *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo: Sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma, Belgorod, 30–31 oktyabrya 2024 goda. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova. 2024. Pp. 54–58. (rus)*
3. Fedorenko I.Ya., Kapustin V.N. Classification of Air Flow Regulators for Ventilation Systems by Design of the Regulating Elements [Klassifikatsiya regulyatorov raskhoda vozduha dlya sistem ventilyatsii po konstruktivnomu ispolneniyu reguliruyushchih elementov]. *Bulletin of Altai State Agricultural University. 2009. No. 8 (58). Pp. 69–73. (rus)*
4. Goltsov A.B. Identification of Factors Affecting the Evenness of Suction by Aspirating Funnel [Vyyavlenie faktorov, vliyayushchih na ravnomernost' vsasyvaniya aspiratsionnymi voronkami]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 19–31. (rus)*
5. Goltsov A.B., Logachev K.I., Ovsyannikov Y.G., Kireev V.M. Numerical Simulation of Air Flows in the Loading Chute of an Aspiration Shelter with Multistage Recirculation Air Seal. *Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 61, No. 6. Pp. 727–734.*
6. Oleksyuk K. M. Oleksyuk Kirill Mikhailovich regulators of constant and variable air flow [Oleksyuk Kirill Mihajlovich regulatory raskhoda postoyannogo i peremennogo potoka vozduha]. *Vestnik Magistratury. 2024. No. 3-2 (150). Pp. 20–21. (rus)*
7. Petrov S.A., Ivanova M.V. Evaluation of the effectiveness of using regulating devices in enterprise aspiration systems [Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya reguliruyushchih ustroystv v sistemah aspiratsii predpriyatij]. *Vestnik promyshlennoj ekologii. 2018. No. 4. Pp. 45–52. (rus)*
8. Sidorov D.E. Inexpediency of Using Control Devices in Aspirating Systems: Scientific Article [Necesnoobraznost' primeneniya reguliruyushchih ustroystv v aspiratsionnyh sistemah: nauchnaya stat'ya]. *Journal of Industrial Ecology. 2023. No. 3. Pp. 45–52. (rus)*
9. Semicheva N.E., Ezhov V.S., Burtsev A.P. Innovative energy-saving technical solutions in ventilation and air conditioning systems [Innovatsionnye energosberegayushchie tekhnicheskie resheniya v sistemah ventilyatsii i kondicionirovaniya vozduha]. *Izvestiya Ūgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. No. 1(64). Pp. 109–114. (rus)*
10. Volkov V.A. VAV Air Flow Regulators - the Basis of a Variable Air Flow Air Conditioning System [Regulatory raskhoda vozduha VAV - osnova sistemy kondicionirovaniya s peremennym raskhodom vozduha]. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2011. No. 4. Pp. 38–41. (rus)*
11. Logachev K.I., Puzanok A.I., Zorya V.U. Numerical study of aerosol dust behaviour in aspiration bunker. *Proceedings European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006. Egmond aan Zee. The Netherlands. 2006. 11 p.*
12. Tkach L.V. Abrasive Wear of Control Devices in Aspirating Systems: Problems and Solutions [Abrazivnyj iznos reguliruyushchih ustroystv v sistemah aspiratsii: problemy i resheniya]. *Nauka i praktika: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: Sbornik statej VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 30 avgusta 2025 goda. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.YU.). 2025. Pp. 44–47. (rus)*
13. Ziganshin A.M., Badykova L.N. Numerical Modeling of Flow in a Profiled Ventilation Tee at Confluence [CHislennoe modelirovanie techeniya v profilirovannom ventilyatsionnom trojнике na sliyanie]. *News of higher educational institutions. Construction. 2017. No. 6(702). Pp. 41–48. (rus)*
14. Borodkin A.A. Calculation of Aerodynamic Parameters of a Ventilation Network [Raschet aerodinamicheskikh parametrov ventilyatsionnoj seti]. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika. 2021. No. 4. Pp. 58–61. (rus)*
15. Tian B., Kubota Y., Murata M. Research on the relationship between the centerline velocity, aspect ratio and exhaust airflow rate for a slot and a rectangular capture hood in an local exhaust ventilation system. *Ind Health. 2023. Vol. 61, No. 3. Pp. 222–231.*
16. Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance [Spravochnik po gidravlicheski soprotivleniyam]. Edited by M.O. Shteinberg. -3rd edition, revised and expanded. Moscow: Mashinostroenie, 1992. Pp. 428–468. (rus)
17. Goltsov A.B., Logachev K.I., Seminenko A.S., Kireev V.M., Yelistratova Yu.V., Serykh I.R., Chernysheva E.V. Alignment of Flows in Aspirating Nozzles [Vyravnivanie potokov v aspiratsionnyh patrubkah]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2024. No. 2(126). Pp. 46–57. (rus)*
18. Goltsov A.B., Logachev K.I., Averkova O.A., Yelistratova Yu.V., and Seminenko A.S. Numerical Modeling of Air Flow in an Aspirating Funnel with an Equalizing Device [CHislennoe modelirovanie vozdušnogo potoka v aspiratsionnoj voronke s vyravnivayushchim ustroystvom]. *News of higher educational institutions. 2024. No. 7(787). Pp. 64–75. (rus)*

19. Arbatsky A.A., Glazov V.S. Calculation of Ventilation Systems for Industrial and Public Buildings Using CFD Modeling Tools [Raschet sistem ventilyacii proizvodstvennyh i obshchestvennyh zdaniy s primeneniem sredstv CFD-modelirovaniya]. *Sovremennye zadachi inzhenernyh nauk: sbornik nauchnyh trudov VI-ogo Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo Simpoziuma «Sovremennye energo- i resursosberegayushchie tekhnologii SETT - 2017»* (Moskva, 11–12 oktyabrya 2017 g.). M.: FGBOU VPO MGUDiT. 2017. Pp. 176–180. (rus)

20. Muftakhov V.Z. Calculation, Theoretical,

and Experimental Studies of the Cavitation Characteristics of Gate-Control Devices with Internal Bypass [Raschetno-teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovaniya kavitatsionnyh harakteristik shibernykh zaporno-reguliruyushchih ustrojstv s vnutrennim bajpasom]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2023. No. 7(760). Pp. 84–92. (rus)

21. Logachev I.N., Logachev K.I. Aerodynamic Fundamentals of Aspiration [Aerodinamicheskie osnovy aspiracii]. St. Petersburg: Khimizdat, 2005. 659 p. (rus)

22. Taliev V.N. Aerodynamics of Ventilation [Aerodinamika ventilyacii]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 295 p. (rus)

Information about the authors

Tkach, Lyudmila V. Postgraduate student. E-mail: koryaka_90@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Goltsov, Alexander B. DSc. E-mail: abgoltcov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Mikhailov, Alexander I. Postgraduate student. E-mail: mihaylov.bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Shalpegin, Daniil S. Master's student. E-mail: danshalp25@gmail.com Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 26.11.2025

Для цитирования:

Ткач Л.В., Гольцов А.Б., Михайлов А.И., Шалпегин Д.С. Исследование местного сопротивления шибберных задвижек в вентиляционных и аспирационных системах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 44–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-44-52

For citation:

Tkach L.V., Goltsev A.B., Mikhailov A.I., Shalpegin D.S. Research of local resistance of sliding doors in ventilation and aspiration systems. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 5. Pp. 44–52. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-44-52

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-53-74

Чечель И.П.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

E-mail: Golden-line7@yandex.ru

ВНЕУРОЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, КАК ДОМИНИРУЮЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОЙ ТИПОЛОГИИ СОВРЕМЕННЫХ ШКОЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье рассматривается формирование и развитие функциональных зон внеурочной деятельности в архитектурно-планировочной структуре зданий учебно-воспитательного назначения российской системы общего образования, которая во многом определила сложившуюся на сегодняшний день типологию школьных зданий. Исследование фокусирует внимание на создании материально-технической базы для организации и ведения внеурочной деятельности и ее роли в развитии архитектурно-планировочной структуры зданий УВН на протяжении всей истории становления российской системы общего образования. Проанализировано развитие функциональных зон на разных исторических этапах, выявлена устойчивая тенденция расширения внеурочных функций в структуре современных зданий школ.

В настоящее время в российском обществе сформирован запрос на общеобразовательные организации, работающие в модели «школа полного дня», в которой внеурочная деятельность играет доминирующую роль, но в настоящее время реализация данного запроса слабо поддерживается сложившейся материально-технической базой, функциональной и архитектурно-планировочной структурой действующих зданий школьных фондов. На основе проведенных комплексных исследований, автором сделан прогноз по дальнейшему развитию архитектурной типологии современных школьных зданий. В качестве возможного направления, к обсуждению вносится предложение о создании многофункциональных образовательных комплексов полного дня с дополнительными функциональными блоками, совмещающими в себе внеурочную деятельность и дополнительное образование дошкольников, школьников и взрослых участников образовательных сообществ.

Ключевые слова: здания учебно-воспитательного назначения (УВН), внеурочная деятельность, доминирующий фактор, образовательный комплекс полного дня, функциональный блок для внеурочной деятельности.

Введение. Образование в России, на протяжении всей своей истории, было направлено на воспитание широко образованной, всесторонне развитой личности будущего российского гражданина. Особое влияние на этот процесс оказала образовательная деятельность, связанная со свободным от уроков временем и направленная на воспитание, гармоничное развитие и дополнительное образование обучающихся. Сегодня эта часть воспитательно-образовательной работы в школе носит название внеурочная деятельность [1].

Внеурочная деятельность в России всегда была неотъемлемой частью воспитательно-образовательного процесса. На разных исторических этапах, в зависимости от ряда факторов, к которым необходимо отнести, в первую очередь, политическое и экономическое устройство государства, цели и задачи этого вида воспитательно-образовательной деятельности определялись по-разному. Это обусловило ее изменявшиеся названия – внеклассная работа, внешкольная работа,

внеурочная работа [2], дополнительное образование, внеурочная деятельность [1], однако смысл ее всегда означал воспитание широко образованной личности, со сформировавшейся жизненной и гражданской позицией на основе патриотизма и любви к Родине. В настоящее время внеурочная деятельность, согласно действующего законодательства РФ, усиливает и расширяет свои позиции и, наравне с классно-урочной деятельностью, является обязательной частью в работе организаций, оказывающих образовательные услуги на всех ступенях общего образования.

Проблема исследования обусловлена тем, что существующий запрос государства и общества к организации внеурочной деятельности, в настоящих условиях не может быть удовлетворен полностью – устаревшая функциональная среда не обеспечивает эту работу в таких ее видах и формах, которые сегодня востребованы, что в первую очередь относится к оказанию образовательной организацией услуги «школа полного дня»¹, которая диктует нахождение школь-

¹ «Школа полного дня» – инновационная модель школьного образования, которая активно внедряется в федеральном и региональных законодательных уров-

нях [Школа полного дня. Методические рекомендации для образовательных организаций// ЦНППМ

ника в стенах школы с 8-00 до 18-00 часов. Главным отличием данной модели от других моделей школьного образования, является развитая внеурочная деятельность, связанная, в том числе, с внешкольным дополнительным образованием. Идея перехода работы организаций, оказывающих образовательные услуги с модели «классической школы» на модель «школа полного дня» поддержана на государственном уровне. На заседании Президиума Госсовета РФ по вопросам образования была отмечена важная социальная роль полудневной школы в поддержке семьи. Организация деятельности учащихся в школе в течение полного рабочего дня, по словам Президента РФ В. В. Путина, дает им «...возможность остаться в школе после занятий, сделать домашние задания, посетить кружки, позаниматься спортом и пообщаться с друзьями – «школы полного дня» очень востребованы сегодня»².

В настоящее время, когда тема перехода работы образовательных организаций на формат «школа полного дня» в профессиональной педагогической среде находится в верхних строчках приоритетов по модернизации системы общего образования в РФ, ключ к организации полудневной школы находится в руках архитектора и лежит в плоскости совершенствования материально-технической базы действующих зданий школ и в поиске новых архитектурных типов зданий и комплексов для объектов общего образования.

В связи с чем актуальным является определение направления развития архитектурной типологии школьных зданий и создание архитектурных моделей, которые могли бы обеспечить в равной степени ведение классно-урочной и внеурочной деятельности в полудневном формате, для ликвидации имеющегося противоречия между сложившимися архитектурно-планировочными решениями существующих зданий школ и новыми дополнительными функциями, связанными с усилением роли внеурочной деятельности и создание оптимальных условий для полноценного физического развития, творческой деятельности и всестороннего, гармоничного развития личности современных российских школьников и наполнение их свободного внеурочного времени новыми видами и формами развивающих занятий в комфортных условиях, с качественным образовательным пространством

внутри структуры, в соответствии с запросом потребителей образовательных услуг, с учетом требований строительного и ведомственного нормирования, для создания равных условий по доступности, качеству и спектру оказываемых образовательных услуг.

На проектирование и строительство зданий УВН оказывали влияние большое количество факторов. Их можно систематизировать по группам, связанным с государственным регулирующим законодательством (законодательные акты федерального и регионального уровней, требования строительного и ведомственного нормирования), педагогическими, социальными (социально-демографические, социально-экономические), природно-климатическими, градостроительными и архитектурными требованиями. В контексте данной работы, наибольший интерес представляет фактор внеурочной деятельности – как доминирующий фактор влияния на функциональную и архитектурно-планировочную структуру здания УВН, во многом определивший современную типологию здания школы.

Объект исследования – российские здания УВН с конца XVII в. по н/время. *Предмет исследования* – развитие функции внеурочной деятельности в архитектурно-планировочной структуре российских зданий УВН.

Цель исследования: определить возможный путь развития архитектурной типологии школьных зданий, в условиях формирования нового взгляда на организацию и оказание услуг внеурочной деятельности, меняющих привычную архитектуру здания школы, для реализации актуальных требований современной российской модели общего образования «школа полного дня».

Задачами исследования являются: 1) выполнить анализ развития функции внеурочной деятельности в структуре российских зданий УВН (XVII–1-я четверть XXI вв., н.время) для определения исходной точки нового этапа эволюции типологии школьного здания; 2) предложить одно из возможных направлений для дальнейшего совершенствования архитектурной типологии современного здания УВН, с учетом особенностей и требований к организации внеурочной деятельности – как доминирующего фактора в формировании архитектуры школьных зданий на современном этапе.

Центр непрерывного повышения педагогического мастерства. URL: <https://golnk.ru/rYIz5> (дата обращения: 14.07.2025); Региональный проект «Организация образовательной деятельности в общеобразовательных учреждениях Белгородской области в режиме «Школа полного дня». URL: <https://golnk.ru/7glvA> (дата обращения: 14.07.2025)].

² Из выступления Президента Российской Федерации В. В. Путина на заседании Президиума Госсовета РФ по вопросам образования (25.08.2021г.) [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20210825/prodlenka-1747218309.html?ysclid=majve71gbj867901578> (дата обращения: 26.07.2025).

Теоретическая значимость исследования заключается в результатах комплексного анализа развития функции внеурочной деятельности в структуре зданий УВН (школы, гимназии, лицеи и др.) на различных этапах исторического процесса и в прогнозе дальнейшего развития архитектурной типологии современного российского здания общего образования.

Границы исследования: типологические – российские здания УВН; географические – Россия на разных исторических этапах (Российская Империя, СССР, Российская Федерация); хронологические – конец XVII–I-я четверть XXI вв., н.время).

Материалы и методы. Работа основана на комплексном подходе и включает в себя ряд последовательно примененных научных методов, это различные виды анализа (историко-типологический, историко-системный, ретроспективный) – для выявления развития функциональных зон внеурочной деятельности в архитектуре школьного здания; структурно-системный подход – для формирования периодизации указанного исторического процесса; изучение архивных материалов и современных документов государственного регулирования развития системы общего образования и архитектуры зданий УВН, специальной литературы и электронных ресурсов различных информационных источников по теме исследования. Работа опирается на широкую базу теоретических исследований и практических работ:

– вопросы истории архитектуры зданий УВН периода Российской Империи отражены в работах Г. В. Барановского, Т. В. Костиной, О. В. Лингевич, В. И. Пилявского, И. И. Поздеева [3–5, 8, 9, 12]; о роли внеурочной деятельности писали М. В. Ломоносов, Д. А. Милютин, П. Ф. Каптерев [6, 7, 10];

– об архитектуре зданий УВН периода СССР рассказано в работах Н. В. Баранова [12], Н. П. Былинкина, Г. И. Верстина, С. Г. Змеул, А. Ф. Ковалева, Ю. В. Лебедевой, В. В. Смирнова, В. И. Степанова, А. К. Соловьева, В. М. Щербининой, С. Е. Советова, С. О. Хан-Магомедова [13–21], в сборниках практических рекомендаций по адаптации архитектурного наследия [22–23];

– архитектуре зданий УВН текущего периода в РФ посвящены работы А. Р. Ключко, Е. И. Коровиной, Ю. В. Лебедевой [24–26];

Рассмотрены исследования, связанные с педагогическим феноменом внеурочной деятельности, выполненные авторами В. В. Лобановым, В. И. Ревякиной [11], труды С. Т. Шацкого, С. И. Дорошенко, Т. С. Пчелинцевой, А. К. Брудновым, А. Г. Асмоловым, А. Н. Гранкиным [27–29].

Изучены ряд интернет-источников, в том числе реестр экономически эффективной проектной документации [30].

В ходе подготовки данной работы автор проанализировал насколько глубоко и всесторонне исследована тема школьного строительства, однако, с точки зрения влияния внеурочной деятельности на формирование архитектуры зданий УВН, она не раскрыта. При этом, в настоящее время вопрос влияния внеурочной функции является доминирующим в современных требованиях, предъявляемых к объекту общего образования.

Проследить эволюционный процесс формирования функциональных зон внеурочной деятельности в архитектурно-планировочной структуре школьных зданий возможно на основе комплексного анализа исторического опыта проектирования и строительства российских зданий УВН.

Основная часть. Типология здания УВН общего образования находится под влиянием изменений в образовательной системе и подвержена постоянному обновлению, ведь запрос, который формирует государство и общество на то, какой должна быть школа, постоянно корректируется под воздействием развития самого государства и общества. В работе рассмотрены российские здания УВН общего образования, которые были запроектированы и построены на протяжении 3-х исторических периодов, это Российская Империя (конец XVII–начало XX вв., 1917 г.), СССР (19–I-я четверть XXI вв., н. время).

Предложенная периодизация этапов исторического процесса раскрывает особенности внеурочной функции и выявляет ее влияние на архитектурно-планировочную структуру школьного здания.

Здания УВН имперской России (конец XVII–начало XX вв., 1917 г.).

Начальный этап (1682–1741 гг.). Начало формирования российской государственной светской школы было положено императором Петром I в конце XVII–начале XVIII вв. Первыми учебными заведениями стали начальные («цифирные») школы, повышенные начальные школы реального типа и гимназии.

Государственная система народного просвещения строилась по сословному признаку: начальное (элементарное) образование в освоении письма и счета было доступно детям крестьян, ремесленников, простых граждан; в повышенных начальных школах реального типа³, обучающиеся, кроме начального образования, полу-

³ БСЭ (Большая советская энциклопедия), авторы М. И. Кондаков, А. И. Пискунов

чали основы рабочих или военных специальностей (артиллерийская, навигацкая, приказная, госпитальная, инженерная, иноязычная и др.); обучение в гимназии было доступно детям дворян, мещан и купцов. Именно в особых сословных учебных учреждениях начала формироваться и получила свое развитие внеурочная деятельность, направленная на воспитание и всестороннее развитие обучающихся.

К учебным заведениям, в которых помимо обучения образовательным дисциплинам, большое внимание уделялось занятиям вне уроков, относится первая российская «Гимназия пастора

Эрнста Глюка» (1703 г.) или, как ее тогда называли – «немецкая школа».

Она была открыта при посольском приказе в Москве в 1705 г. и готовила профессиональных переводчиков для государственной службы. В гимназии изучали общий курс, историю, философию, несколько иностранных (европейских) языков. Обязательным предметом, который ввел лично император Петр I, была физическая подготовка гимназистов. Учебное заведение размещалось в приспособленном здании — бывшем доме с подворьем боярина В. Ф. Нарышкина (рис.1а; табл.1, п.1).



Рис.1. а) Гимназия пастора Эрнста Глюка. Москва, угол Большой Покровской улицы и Златоустинского переулка (ул.Маросейка,11), 1705 г.; б) Академическая гимназия, арх. Д. Трезини; С. И. Чевакинский, А. Г. Бежанов, Гинц П. (в разные годы), Санкт-Петербург, 1794 г.; в) Первое здание Университетской гимназии, арх.Д. В. Ухтомский, Москва, 1755г.; г) Первая Императорская гимназия, арх.М. Е. Емельянов. Казань, 1798 г. [5].

В 1724 г. император Петр I учредил российскую Академию Наук и Художеств (г Санкт-Петербург), при которой были открыты первые Академическая гимназия и Академический Университет. Гимназия, с момента своего основания, располагалась в приспособленных, арендуемых домах и только к 1794 г. у нее появился свой «Гимназический дом» (рис. 1б; табл. 1, п.2). В функционально-планировочную структуру входили учебные помещения, спальни для младших школьников, библиотека, жилые комнаты гимназистов и студентов, квартиры профессорско-преподавательского состава, обеденные залы с кухнями, вспомогательные бытовые помещения, лазарет на 5 кроватей, карцер, помещения обслуживающего персонала (охрана, консьерж, лакеи). «во дворе были сооружены баня с предбанником и водогрейной; сарай и конюшни»; летом 1794 г. была устроена купальня «на барке» из соснового леса». В гимназии, когда она размещалась в доме Строгановых (1766 г.), впервые было предусмотрено помещение для проведения досуга — «каток для кегель», так в то время называлось помещение для игры в кегли [4]. Первые организованные формы внеурочной деятельности в России появились к середине XVIII в. в военно-учебном заведении, которое получило название «Корпус кадетов шляхетских детей»⁴ в г. Санкт-Петербург [5].

Основной этап (1741–1855 гг.). Кадетский корпус был задуман, как школа для детей «всех служивых отцов» – благородных дворян, заслуженных офицеров и чиновников для подготовки к офицерской военной или государственной службе. В военно-учебном заведении кадеты получали среднее общее и специальное военное образование, важное место отводилось воспитательной и внеклассной работе (рис. 2, табл. 1, п. 3).

Располагалось учебное заведение первоначально в бывшем дворце первого генерал-губернатора Санкт-Петербурга Светлейшего князя А. Д. Меншикова на Васильевском острове, затем был построен новый корпус на Кадетской линии (1730–1770 гг.). В архитектурный комплекс корпуса кадетов входили здания с жилыми и учебными помещениями, столовая, квартиры учителей и обслуживающего персонала, домовая церковь, спортивный зал, манеж, ботанический сад (рис.2).

Аналогичные внеурочные функции были в Университетской гимназии (Москва, 1755 г.), открытой императрицей Елизаветой I при созданном ею Московском Государственном Университете (рис.1в, табл.1, п.4), в Благородных пансионах (табл.1, п. 5) и лицеях (рис.3).

⁴ Учрежден Указом императрицы Анны Иоанновны от 29 июля 1731г.



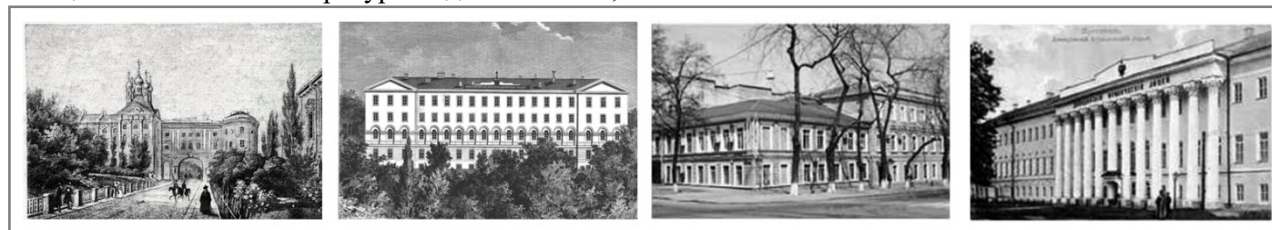
Рис. 2. Корпус кадетов шляхетских детей, арх. Д. М. Фонтана, Г. И. Шедель, Д. Трезини (в разные годы), Санкт-Петербург, 1731–1918 гг.

В 1778 г. в составе Московского Университета было организовано учебное заведение, получившее название Московский Университетский Благородный пансион – закрытое учебное заведение, состоящее из 2-х отделений для мальчиков дворянского и разночинского сословий, учреждённое по инициативе М. М. Хераскова (директор МГУ с 1763 по 1770 гг.). Московский Университетский Благородный пансион представляет большой интерес для исследования феномена внеурочной деятельности.

Здесь в 1799 г. состоялось учреждение литературного общества – «Собрание воспитанников университетского Благородного пансиона», первым председателем которого стал поэт В. А. Жуковский. Огромное место в свободное время обучающихся занимала литературная деятельность,

ученики составляли сборники статей, выпускали ежемесячные журналы, зимой устраивались театральные постановки. Из дневника воспитанника Пансиона графа Д. А. Милютина «...все эти внеклассные занятия, конечно, отнимали много времени от уроков; зато чрезвычайно способствовали общему умственному развитию, любви к науке, литературе, чтению; а такой результат едва ли даже не плодотворнее одного формального школьного заучивания учебников...» [6].

Московский Университетский Благородный пансион послужил образцом для создания лицеев – еще одного типа сословных учреждений УВН имперского периода. Лицеи занимали промежуточную ступень между гимназией и университетом (рис. 3; табл. 1, п. 5).



а) Императорский Царскосельский лицей, Санкт-Петербург, Царское село, арх. Д. Кваренги, В. П. Стасов (в разные годы), 1811 г.;
б) Императорский Александровский лицей, арх. Л. И. Шарлемань и др., Санкт-Петербург, 1831–1911 гг.; в) Ришельевский лицей, арх. Шашин А. С., Одесса, 1817 г.;
г) Демидовский лицей, Ярославль, 1803–1918 гг.

Включение вопросов воспитания и гармоничного развития личности в систему общего образования стало особенно актуальным при императрице Екатерине II Великой, во время правления которой произошел коренной поворот в определении целей народного просвещения в России. Ее правление характеризуется новым подходом к образованию, который впервые состоял в том, что необходимо не только образовывать и обучать, но и воспитывать «совершенного человека и гражданина» [7]. Следствием выражения ее взглядов, явилось создание новых типов учебных заведений закрытого типа, это – Воспитательные общества, Благородные пансионы, Мещанские училища, Коммерческие училища, Воспитательные Дома для подкидышей, специализированные Училища (для глухонемых) и др.,

которые охватывали самые различные социальные слои и группы населения.

Деятельность «Воспитательных обществ благородных девиц» была направлена на воспитание и обучение девочек из благородных семейств. В образовательную программу входило изучение иностранных языков, русская словесность, арифметика, история, география, рисование, танцы, рукоделие и различные виды домоводства, правила «светского обхождения» и «закон божий», внеурочная деятельность была широко развита. По схожей программе воспитывали и обучали девочек из мещанских семей в «Мещанских училищах» (рис. 4 а, б, в, табл. 1, п. 6). «Воспитательные Дома для сирот и подкидышей» создавались с целью ухода за брошенными и беспризорными детьми, детей учили основам

грамоты и простым профессиям (рис. 5 а-г, табл. 1 п.7).

Функционально-планировочная система словных учебных заведений утвердилась в России во второй половине XVIII в. Она была достаточно разработана и заключалась в четком вертикальном функциональном зонировании: на 1-м

этаже размещались обеденный зал столовой и хозяйственные помещения, на 2-м этаже – учебные помещения с просторным залом, на 3-м этаже располагались спальни. Помещения на этажах размещались по сторонам широкого коридора-рекреации [8].



а) б) в) г)

Рис. 4. а) Екатерининский институт благородных девиц, арх. Д. Кваренги, Санкт-Петербург, 1804–1807 гг.; б) Воспитательное общество благородных девиц (Смольный институт), арх. Д. Кваренги, Санкт-Петербург, 1806–1808 гг.; в); г) Мещанское училище, Санкт-Петербург, арх. Ю. М. Фельтен, 1765–1775 гг.



а) б) в) г)

Рис. 5. а) Московский Императорский воспитательный Дом для сирот и подкидышей, арх.: Ю. М. Фельтен (предп.), К. И. Бланк, Джованни и Доменико Жиллярди, А. Григорьев, К. Быковский, П. Самарин (в разные годы), Москва, 1764–1767 гг.; б) Санкт-Петербургский Воспитательный дом, 1770–1772 гг.; в) Военно-сиротский дом, Санкт-Петербург, 1797 г.; г) Приют для больных детей, Санкт-Петербург, 1901 г.

Для имперского периода характерно развитие зданий УВН по сословному признаку, поэтому архитектура зданий школ отличается большим разнообразием, школы для привилегированных и непривилегированных граждан значительно разнятся [3, 8, 9]. Условия для всестороннего и гармоничного развития личности обучающихся возможны только для господствующего дворянского сословия, в ограниченном виде доступны для мещан и купцов и недоступны для низших слоев населения.

Завершающий этап (1855–1917 гг.). В конце XIX в., силами меценатов, педагогов и прогрессивных общественников начала формироваться новая российская система учреждений дополнительного образования детей и взрослых из неимущих сословий (в рамках общей системы народного просвещения, так называемая «общественная педагогика» [10]), которая нашла отражение в появлении зданий УВН новой типологии.

Педагог-общественник В. С. Писурский (г. Томск) разработал свою уникальную систему оздоровления и воспитания детей и взрослых. Он создал «Сад трезвых развлечений» (1897 г.) –

первый физкультурный городок для занятий гимнастикой и разработал первые курсы гимнастики (1919 г.); построил первый в стране «Дом физического развития (Манеж)» (1904–1913 гг.), выступал как организатор детских ясель, дошкольных и школьных площадок для различных видов активностей (рис. 6а) [11].

Архитектор и педагог А. У. Зеленко, в соавторстве с педагогом С. Т. Шацким развивали архитектуру зданий для внешкольных занятий. Они организовали детский клуб общества «Сетлемент», который позже получил название «Дом общества детский труд и отдых» (1907–1910 гг.).

По проекту А. У. Зеленко построено здание Дома, в котором размещался детский сад для детей рабочих, начальная школа и ремесленное училище. А. У. Зеленко – автор первого здания детского сада, тогда он назывался «Дневной приют для приходящих детей» (г. Москва) (рис. 6 б, в).

Меценаты передавали свои загородные дачи для отдыха больных или детей из бедных семей, которые стали прототипами советских детских лагерей отдыха (рис. 6 г).

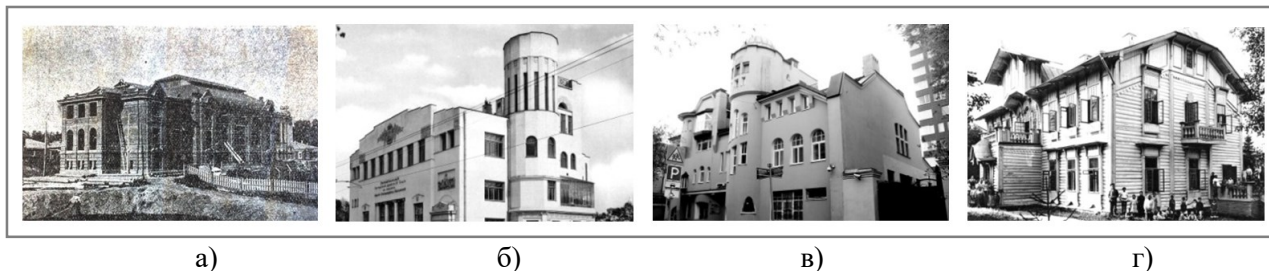


Рис.6. а) Дом физического развития (Манеж) г. Томск, Западная Сибирь 1904–1913 г. Автор идеи – педагог-общественник В. С. Писурский; б) Универсальный Детский сад памяти О. Н. Кельиной, арх. А. У. Зеленко, Москва, 1910–1912 г.; в) Детский клуб общества Сетлемент, арх. А. У. Зеленко, педагог С. Т. Шацкий, Москва, 1907–1910 г.; г) летняя колония детей в Подмоскowie.

Таким образом, основными типами зданий УВН имперского периода с функцией внеурочной деятельности могут считаться сословные военно-учебные заведения, воспитательные общества, гимназии, благородные пансионы и лицеи. Из всего имперского периода именно XVIII век, так называемый «женский век» в истории монархии в России, стал наиболее важным этапом в становлении российской архитектурной типологии зданий УВН с функцией внеурочной деятельности, в то время как конец XIX века дал российской архитектуре здания для внешкольного образования. К основным направлениям внеурочной деятельности этого периода возможно отнести: *религиозное православное воспитание, литературную деятельность, воспитание культуры общения и поведения, физическую подготовку, художественно-эстетическое развитие, в том числе театральную деятельность, научно-познавательную и досуговую деятельность* – эти виды деятельности были характерны для особых сословных учебных заведений господствующего класса. Основными видами внеурочной деятельности в учебных заведениях низшего класса были *религиозное православное воспитание, общественно-полезный труд и профориентация, освоение ремесел*.

Функциональные зоны и помещения для внеурочной деятельности присутствуют в архитектурно-планировочных решениях зданий особых сословных учебных заведений привилегированных сословий (табл. 1).

Советская школа (1918–1991 гг.).

Переходный этап (1918–1922 гг.). В Советской России были полностью пересмотрены принципы организации системы народного образования. Конституция РСФСР от 10 июля 1918 г. обеспечила каждому гражданину общедоступное, полное, всестороннее, бесплатное и обязательное образование, «...в целях обеспечения за трудящимися действительного доступа к знанию...». Внеурочная деятельность была основана

на концепции трудовой школы, общественно-полезном труде и профориентации.

Довоенный этап (1923–1941 гг.). Начало новой архитектуры школ было положено экспериментальным индивидуальным проектированием 1920-х гг., которое отражало масштаб революционных преобразований в стране. Для школ этого времени характерны вместимость до 2500 учащихся, что определило большой строительный объем и площадь здания; объемно-пространственная композиция была основана на принципах авангарда, для которого характерны сложная ассиметричная форма и разновысокие объемы; школы строились на окраинах городов и были максимально приближены к промышленным предприятиям.

Здания строились с большим количеством общественных помещений (мастерские, столовые, залы и т.д.), школа функционировала на основе бригадно-лабораторного метода обучения (табл. 2, п. 1) [12, 13].

К 1930-м гг. стало понятно, что индивидуальное авторское проектирование крупных школьных объектов не решает проблему обеспечения необходимым количеством ученических мест в масштабах страны.

Начиная с 1935 г.⁵ страна перешла на массовое строительство зданий школ по типовым проектам на основе индустриального, унифицированного производства.

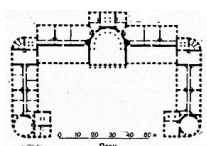
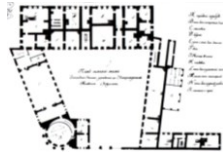
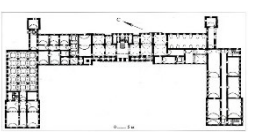
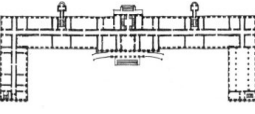
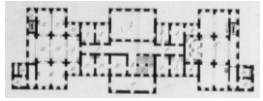
Для первых типовых проектов 1935–1955 гг. характерна П-образная планировочная схема и композиционные приемы, берущие начало в классическом архитектурном наследии. Функциональная структура зданий лаконична и содержит функциональные зоны только для классно-урочной работы (в это время педагоги отошли от бригадно-лабораторного метода и вернулись к классно-урочной системе, которую ввела императрица Екатерина II).

⁵ Постановление СНК ВКП(б) 15 мая 1934 г. «О начальной и средней школе». Постановление СНК ВКП(б) и ЦК ВКП(б). Постановление «О организации учебной работы и внутреннем распорядке в начальной, неполной средней и

средней школе» от 3 сентября 1935 г. Библиотека нормативно-правовых актов Союза Советских Социалистических Республик. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.libussr.ru/>. (дата обращения: 26.07.2025).

Таблица 1

Здания УВН имперского периода (конец XVII—начало XX вв., 1917г.)

№	Планировочная схема	Виды и формы внеурочной деятельности	Функциональные зоны и группы помещений
УВН 1-я четверть XVIII в.			
1	Приспособленное здание	физическая подготовка: стрельба из пистолета, гребля, парусное дело, верховая езда, фехтование	приспособленные помещения
2	Приспособленные здания	воспитание культуры общения и поведения: обучение танцам, правилам общения; досуговая деятельность: чтение, игры, в т.ч. в кегли, прогулки	приспособленные помещения зоны досуга: «каток для кегель» — кегельбан
УВН середина XVIII в., 2-я половина XIX вв.			
3		религиозное православное воспитание участие в богослужениях, посещение воскресной школы, церковные праздники физическая подготовка: стрельба из пистолета, гребля, парусное дело, верховая езда, фехтование, игра в мяч воспитание культуры общения и поведения: обучение танцам, проведение балов, литературная деятельность: поэтические вечера, участие в работе литературного кружка, издание журнала учебного заведения театральная деятельность: участие в театральных постановках любительского театра учебного заведения	домовая церковь зона физической подготовки: плац, спортивный зал конный манеж кегельбан зона литературной деятельности: универсальный зал, библиотека, типография зоны театральных постановок, воспитания культуры общения и поведения: универсальный зал зона изучения флоры ботанический сад зоны досуга: универсальный зал библиотека парк, каток
4			
5		познавательная деятельность: изучение и наблюдение за растениями досуговая деятельность: чтение, общение, игры, в т.ч. в кегли, прогулки и игры на свежем воздухе, катание на коньках	
6	 	религиозное православное воспитание участие в богослужениях, посещение воскресной школы, церковные праздники физическая подготовка: поддержание здоровья, уход за собой; воспитание культуры общения и поведения: обучение танцам, проведение балов, пение, обучение игры на фортепиано, обучение общению; поэтические вечера, чтение книг; досуговая деятельность: общение, прогулки и игры на свежем воздухе, катание на коньках профорIENTATION: подготовка гувернанток, домашних учительниц, классных наставниц, фрейлин, освоение основ домоводства	домовая церковь зона литературной деятельности: универсальный зал библиотека зоны досуга: универсальный зал библиотека парк каток классные помещения
7		религиозное православное воспитание участие в богослужениях, посещение воскресной школы, церковные праздники предпрофессиональная подготовка, освоение ремесел	домовая церковь мастерские

Послевоенный этап (1945—1959гг.).

Школы проектировались на 280, 400, 880 мест (рис.7 а, б; табл. 2, п.2). В 1956–1959 гг. принятая П-образная планировка была модифицирована и

дополнена зальным помещением. За счет оптимизации площадей изменилась номенклатура зданий, школы проектируются на 280, 520, 920 мест. Внеурочная деятельность ведется в классных помещениях и мастерских (рис.7 в, г; табл. 2.п.3) [14].



а)

б)

в)

г)

Рис. 7. Средние школы 1935—1959 гг. а) однокомплектная средняя школа на 400 уч-ся, арх. М. А. Малыгин, б) Н. М. Вавировский (1935 г.), в) средняя школа на 520 уч-ся, т.п. 2-02-17, арх. А. К. Чалдымов, С. Н. Змеул, С. Ф. Наумов (1956 г.); г) двухкомплектная средняя школа на 920 уч-ся, т.п. 2-02-73, арх. И. Ю. Каракис (1957 г.)

В это время в стране проводилась политика⁶, направленная на помощь семье, была определена необходимость предусматривать в составе школы группы продленного дня для присмотра и дополнительных занятий с детьми, что определило развитие функции внеурочной деятельности в архитектурно-планировочной структуре здания школы. Включение в организационно-педагогическую структуру школы групп продленного дня стало отправной точкой в формировании современной полудневной школы.

Развитый этап (1960–1970 гг.).

В 1960-х гг. на основе СНиП II-Л.4-62 реализуется новая концепция объемно-планировочной организации здания – Н-образная планировочная схема с разновысокими объемами корпусов, соединенными между собой наземным переходом, которая пришла на смену привычной П-образной школе. В типовых зданиях 8-и летних и 11-и летних школ 1960-1963-х гг. на 320, 480, 536, 640, 960, 964, 432 мест и универсальных зданиях школ 1964-1970-х гг. на 320, 480, 640, 960, 1280 мест выделены учебный и общешкольный функциональные блоки, впервые в планировку включено новое помещение для работы общественных организаций — большая часть внеурочной работы велась через пионерскую и комсомольскую общественные организации (рис. 8 а, б; табл.2, п.4) [21, 22, 23].

Поздний этап (1971–1980 гг.). В 1970—1980 гг. типология зданий школ претерпела очередные изменения, в это время были разработаны типовые проекты 8-ми летней школы на 8 классов (192 и 320 ученических мест) и 10-ти летней школы на 10, 12, 16, 20, 30, 40 классов (392, 464, 624, 784, 1176, 1568 ученических мест).

1970-е гг. стали ключевыми в формировании архитектуры здания школы с продленным днем. Руководствуясь СНиП II-65-73, ЦНИИЭП учебных зданий (отдел школ и внешкольных учреждений) под руководством архитектора В. И. Степанова, впервые разработал типовой проект

3-х этажного кирпичного здания 10-ти летней средней школы на 30 классов с группами продленного дня (т.п. № 224-1-114, 224-1-142, 224-1-148, 224-1-358) и его панельные аналоги (т.п. № 222-1-126, 222-1-158, 222-1-289) (рис.9, табл.2, п.5) [15].

Во 2-й половине 1970-х гг. разработаны несколько новых объемно-планировочных решений для зданий школ – это централизованные и блочные здания в панельном исполнении. Блочное здание (т.п. 222-1-197) проектировалось с бассейном для оздоровительного плавания (рис. 8 в, г; табл.2, п.6) [16]. На завершающем этапе 1981-1991 гг. введены типовые проекты средних общеобразовательных школ на 11, 18, 22, 33, 44, 33+33 классов (440, 704, 844, 1296, 1668, 1728, 2502/ 2592 ученических мест) [17–19].

Завершающий этап (1981–1991 гг.).

Наибольшие изменения в функциональном составе можно видеть в проектах 1985–1986 гг., которые содержат развитую группу помещений для занятий школьников в свободное от уроков время (рис. 10, табл. 2, п. 7).

На завершающем этапе советского периода шла работа над совершенствованием архитектурно-планировочных и объемно-пространственных решений зданий школ. Так, например, в Белгородской области в середине 1970-х годов на селе начали создавать учебно-воспитательные комплексы (УВК) за счет реорганизации действующих школ, а после 1992 г. уже строились новые здания УВК по разработанным индивидуальным проектам. Архитектура новых зданий УВК отражала актуальный для того времени запрос к организации свободного времени сельских школьников и обеспечивала для них условия, равные с городскими. Здания строились с бассейнами, детскими садами малой вместимости, мастерскими и помещениями для занятий после уроков в кружках и спортивных секциях (рис.11, табл.2, п.8) [20, 26].

⁶ Закон СССР «Об укреплении связи школы с жизнью и о дальнейшем развитии системы народного образования в

СССР» 28 декабря 1958 г. и Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 15 февраля 1960г. №182 «Об организации школ с продленным днем».



Рис. 8. а), б) Средние школы 1960-х гг. т.п. 2С-02-07, 2Р-02-1, в), г) Средние школы середины 1970-х гг., т.п. 222-1-193, арх. Т. А. Газеров, т.п.222-1-197/75. ЦИТП Гипропрос, ЦНИИЭП учебных зданий



Рис. 9. 10-ти летняя средняя школа на 30 классов с группами продленного дня, т.п.224-1-114 ЦНИИЭП учебных зданий, арх. В. И. Степанов и др. (1968 г., введен в действие в 1970 г.)



Рис. 10. Здания СОШ, которые строили по типовым проектам 1985–1986 гг. до завершения советского периода



Рис. 11. Учебно-воспитательный комплекс на 660 мест в с. Головчино. Белгородская область, 1990 г.

По месту и времени проведения внеурочная деятельность делилась на внеклассную (проводилась вне класса), внешкольную (проводилась вне школы) и внеурочную (проводилась после уроков) [5, 27–29]. Внеклассная и внеурочная работа, в большей степени относилась к работе классных руководителей, проходила на площадях школы. В зданиях школ она велась по нескольким направлениям, это – предметные кружки, различные виды коллективной деятельности, техническое творчество, юннатская работа, эстетическое воспитание, физкультурная и военно-патриотическая работа и была организована в классных и общешкольных помещениях, учебных мастерских и на территории школы (табл. 2).

Проектирование и строительство зданий внешкольных учреждений получили мощное развитие в советский период. В основе зданий внешкольных учреждений лежала типология зданий

для дополнительного образования детей и взрослых имперского периода, которая трансформировалась в Дома культуры, Дома пионеров, летние лагеря отдыха, детские клубы и др. Первоначально это были мульти-дисциплинарные здания, а в 1970-1980-х гг. были разработаны и реализованы типовые проекты специализированных зданий по отдельным техническим и творческим направлениям : детские юношеские спортивные школы (ДЮСШ), детские школы искусств (ДШИ), детские музыкальные школы (ДМШ), станции юных натуралистов (СЮН), станции юных техников (СЮТ) (рис. 12). Развитие архитектурной типологии зданий школьного и внешкольного образования шло параллельно, их функции были разделены.

Таким образом, основными зданиями школ с функцией внеурочной деятельности советского периода можно считать здания, построенные по типовым проектам развитого и завершающего

этапов – это первый проект 10-летней школы с помещениями для группы продленного дня (1970

г.), школы 1985, 1986 гг. и последующие до 1991 г.

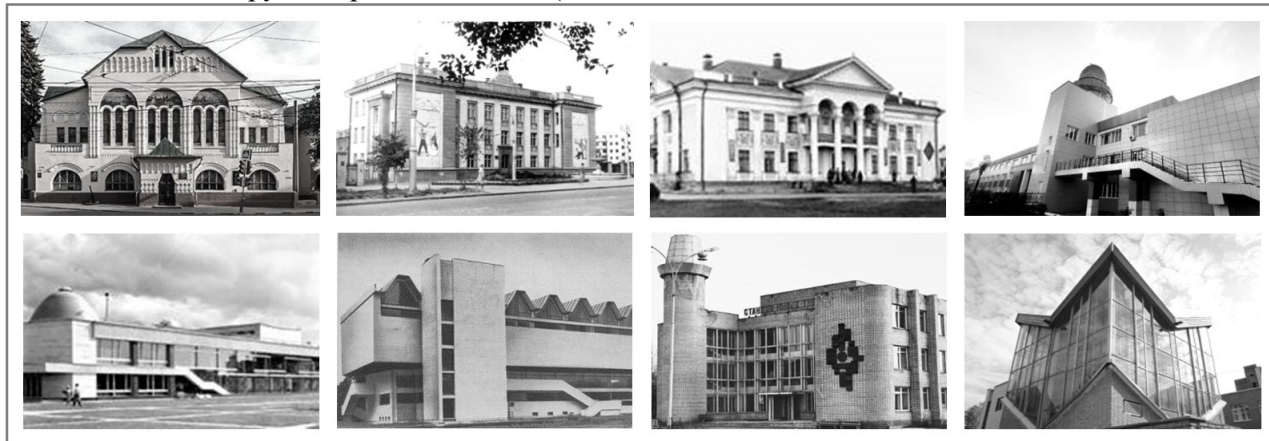


Рис. 12. Здания внешкольных учреждений детей и школьников (1918–1991 гг.).

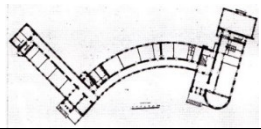
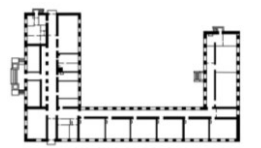
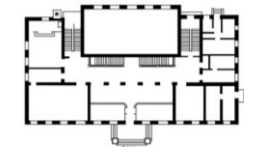
К основным направлениям внеурочной деятельности советской школы относятся: образовательное, общественно-политическое, технок-трудовое, эстетическое, спортивно-туристское [15], которые реализуются в разнообразных ее видах и формах (художественное воспитание, спорт, чтение книг, занятия в предметных кружках, техническое творчество, туризм, юннатство и работа в группах продленного дня) [27–30].

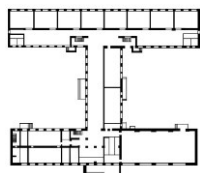
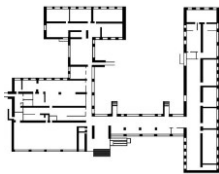
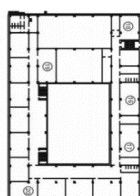
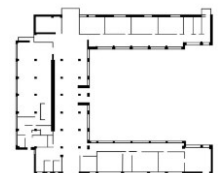
До завершения советского периода группа помещений внеурочной деятельности в структуре школы поступательно развивалась.

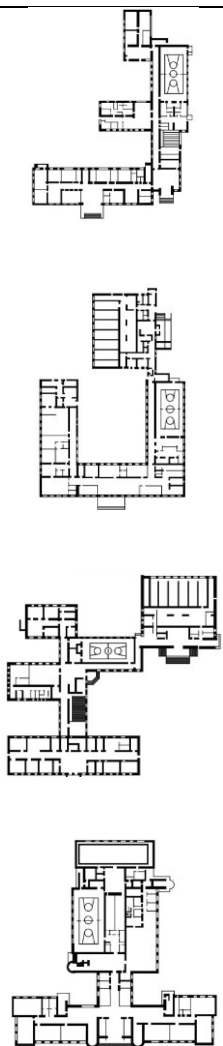
Эволюция архитектурно-планировочной структуры здания массовой школы и ее связь с развитием функции внеурочной деятельности, показана в таблице 2.

Таблица 2

Здания школ советского периода (начало XX–конец XXв.)

№	Название объекта	Виды внеурочной деятельности	Функциональные зоны группы помещений
1918–1934гг индивидуальные проекты			
1		– физкультурная – освоение программ профорientации, – познавательная – образовательная – культурно-массовая работа	спортивный зал; лаборатории и мастерские; зона познавательная; обсерватория; зимний сад; библиотека; актовый зал
1936–55 гг. Средняя школа на 280, 400, 880 мест			
2		– предметные кружки – различные виды коллективной деятельности – техническое творчество – юннатская работа – эстетическое воспитание – физкультурная и военно-патриотическая – работа	классные помещения, лаборатории (сокращенный набор)
1956–59 гг. т.п. Средняя школа на 280, 520, 920 мест			
3		– предметные кружки – различные виды коллективной деятельности – техническое творчество – юннатская работа – эстетическое воспитание – физкультурная и военно-патриотическая работа	классные помещения, лаборатории, актовый зал, помещения для трудового обучения (мастерские) участок школы, спортивный зал
1960–63 гг. Средняя школа на 320, 480, 536, 640, 960, 964, 432 мест (8-и летние и 11-и летние школы)			
1964–70 гг. Универсальные здания школ на 8, 12, 16, 24, 32 классн. пом. (320, 480, 640, 960, 1280 мест)			

4		– предметные кружки – свободное чтение и различные виды коллективной деятельности – техническое творчество – юннатская работа – эстетическое воспитание – физкультурная и военно-патриотическая работа	классные помещения, кабинеты, лаборатории, библиотека, актовый зал-кинокласс, фотолaborатория, комната общественных организаций, мастерские, участок школы, гимнастический зал
1970-80 гг. Восьмилетние школы на 8 классов (192 и 320 уч. мест). 10-ти летняя общеобразовательные школы на 10, 12, 16, 20, 30, 40 классов (392, 464, 624, 784, 1176, 1568 уч. мест) с ГПД			
5		– общие формы продленного дня, подготовка домашних заданий	помещения группы продленного дня
		– предметные кружки	классные помещения, учебные кабинеты, лаборатории, библиотека, актовый зал, киноаудитория, комната общественных организаций
		– техническое творчество	мастерские, фотолaborатория
		– юннатская работа	участок школы
		– эстетическое воспитание	классные помещения, актовый зал, кинокласс
		физкультурно-оздоровительная	гимнастический зал
6	 	– предметные кружки – свободное чтение и различные виды и различные виды коллективной деятельности	классные помещения, учебные кабинеты, лаборатории, кружковое универсальное помещение для младших классов библиотека-читальный зал учебно-методический кабинет по профильной ориентации учащихся; пионерская комната; комната общественных организаций; актовый зал;
		– техническое творчество	мастерские, фотолaborатория
		– эстетическое воспитание и общие формы продленного дня	классные помещения, актовый зал-кинокласс
		– физкультурная и военно-патриотическая работа	учебно-спортивный зал, тир, бассейн
1981-1991 гг. Средние общеобразовательные школы на 11, 18, 22, 33, 44, 33+33классов (440, 704, 844, 1296, 1668-1728, 2502/2592 уч. мест)			
7	 	– работа групп продленного дня (ГПД) – общие формы продленного дня, подготовка домашних заданий, отдых	кабинет организатора воспитательной работы помещение ГПД для проведения учебно-воспитательных занятий; помещение ГПД для организации внеурочной работы, универсальные помещения ГПД
		– образовательная – предметные кружки – дополнительные программы, углубленное изучение отдельных предметов	классные помещения, учебные кабинеты, лаборатории,
		– общественно-политическая – агитбригады, политинформации, встречи с ветеранами, слеты, шефская помощь, субботники	классные помещения, учебные кабинеты, актовый зал-лекционная аудитория, библиотека, читальный зал; красный уголок, пионерская комната, комитет ВЛКСМ, комната ученического самоуправления,

8			кабинет политпросвещения, комната ДНД, кабинет начальника ДНД
		– техничко-трудова – ученические производственные бригады, секции, кружки технического творчества	мастерские, кружковые помещения технического моделирования
		– юннатская работа	участок школы и сооружения на нем (географическая площадка, учебно-опытная зона)
		– эстетическая (кульпоходы, кружки, творческие объединения, концерты), – зона свободного чтения и различных видов коллективной деятельности	актовый зал-лекционная аудитория зона эстетического воспитания студий и кружков хореографии, живописи, рисунка, скульптуры, юннатов, универсальное кружковое помещение младших классов, кружковое универсальное помещение, кино и фотолаборатория, кабинет изобразительного искусства, кабинет пения, библиотека
		– спортивно-туристическая (походы, экскурсии, слеты), физкультурная и военно-патриотическая (сдача норм ГТО, игра «Зарница», поисковые объединения и клубы)	спортивный зал и спортивные плоскостные сооружения кабинет начальной военной подготовки, тир, бассейн
		– досуговая (прогулки, игры), – профорентация – освоение рабочих специальностей, работа на предприятиях	помещение для настольных игр кабинет профессиональной ориентации, учебно-методический кабинет

Общеобразовательная школа и другие здания УВН РФ (1992 г. – н.время).

Переходный этап (1992–2011 гг.).

В наследство от советского периода российская школа получила сформировавшуюся архитектурно-планировочную структуру здания школы, в которой помещения для занятий вне уроков занимают значительное место. К сожалению, на этом этапе было ослаблено положение внешкольных учреждений, многие из которых были перепрофилированы или закрыты, но при этом несколько дополнены новыми частными учреждениями специализированных функций.

В настоящее время для государственных организаций характерны многопрофильные Дворцы творчества, оказывающие широкий комплекс услуг (Дворцы творчества) и узкоспециализированные, например, ДЮСШ; для частных организаций – это оказание «узких» услуг (подготовка к школе, репетиторство, развитие речи, изучение языков, организация праздников, группы кратковременного пребывания и др.). После накопившейся усталости от типового проектирования, на переходном этапе (1992–2011 гг.) активно развивалось авторское, индивидуальное

проектирование новых школ, которое, все же было основано на объемно-планировочных решениях советского периода [24, 25]. В 1992 г. принятый Закон РФ «Об образовании» ФЗ № 3266-1 от 10.07.1992 г. внес принципиально новые социально-педагогические и организационные аспекты в российское образование. Сегодня к основным типам зданий УВН относятся начальные, основные, полные средние общеобразовательные школы и школы с углубленным изучением отдельных предметов (УИОП) гимназии, прогимназии, лицеи, специализированные школы, образовательные центры и комплексы, кадетские школы, инженерные, православные, воскресные, школы-интернаты, вечерние школы и др. (рис.13).

Основной этап (2012–2019 гг.). В 2012 г. принят новый Закон РФ «Об образовании в Российской Федерации» № 273-ФЗ от 29.12.2012 г., введены базовые стандарты общего образования обязательные для всех организаций, оказывающих образовательные услуги; характерно единство образовательных программ на всех ступенях общего образования; внеурочная деятельность

входит в образовательный процесс, как требование стандартов образования, наравне с урочной деятельностью; определен принцип доброволь-

ности выбора услуг; значительное место отведено внеурочной деятельности и школе полного дня (рис. 14).

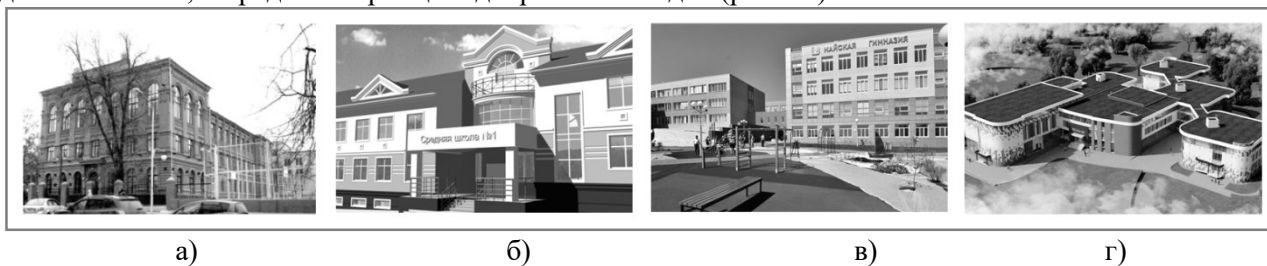


Рис.13. СОШ 1992–2011 гг. (на примере Белгородской области). а) объект приспособления зданий конца XIX–начала XX гг.; в) реконструкция СОШ советского периода; б), г) новое строительство по авторским проектам

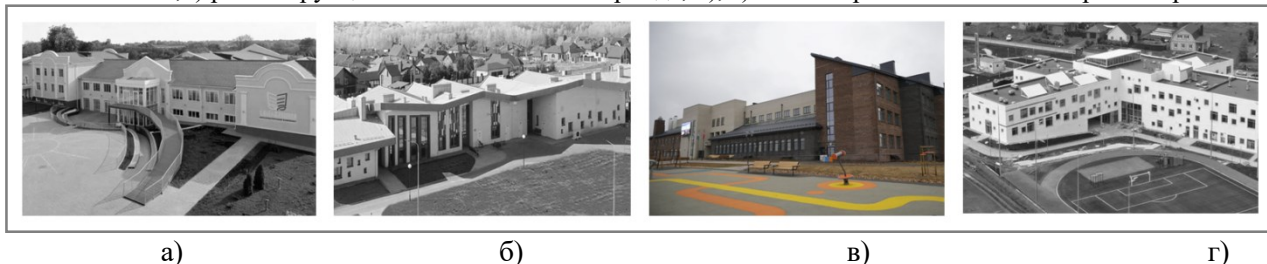


Рис. 14. СОШ 2012–2020 гг. (на примере Белгородской области). а) реновация школ в образовательные комплексы; б), в), г) строительство новых школ по индивидуальным и повторно примененным проектам

Текущий этап (2020–2026 гг.). На текущем этапе распространение получают образовательные комплексы, в которые включают в себя образовательные организации разных ступеней общего образования (начальная школа – НОШ, основная школа – ООШ, полная средняя школа – СОШ) с функциональными блоками для внеурочной работы и дополнительного образования. В качестве примера можно привести частный комплекс «Хорошкола» в районе Хорошёво-Мневники города Москва, который включает в свою организационно-педагогическую структуру прогимназию, гимназию и внеурочный (досуговый) центр (рис. 16ж).

К основным направлениям внеурочной деятельности современной школы относятся: общеинтеллектуальное, духовно-нравственное, социальное, общекультурное и спортивно-оздоровительное направления для всестороннего и гармоничного развития личности школьников и их социализации, которые реализуются в 9 видах внеурочной деятельности: познавательная деятельность, спортивно-оздоровительная, игровая дея-

тельность, проблемно-ценностное общение, досугово-развлекательная, художественное творчество, социальное творчество, туристско-краеведческая, трудовая деятельность, профориентация, работа групп продленного дня, школьное самоуправление, дополнительное образование по творческим специальностям.

Эти направления реализуются через следующие виды деятельности: изучение природы (экологическое воспитание, формирование мировоззрения); познание (развитие познавательной сферы, интеллекта); творчество (художественно-эстетическое воспитание, развитие творческих способностей, техническое творчество); нравственность (нравственное и толерантное воспитание); труд (трудовое воспитание, профориентация); граждановедение (гражданское, патриотическое правовое воспитание); физкультурно-спортивная и оздоровительная деятельность для укрепления здоровья.

Здания для внеурочной деятельности за пределами стен школы также расширяют свою типологию (рис.15).

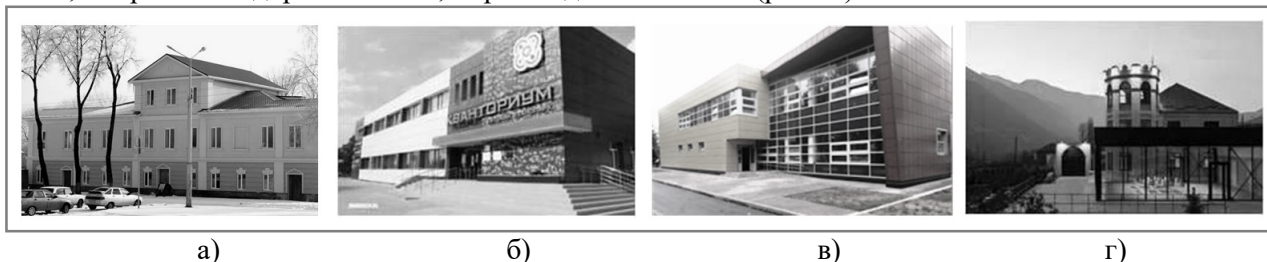


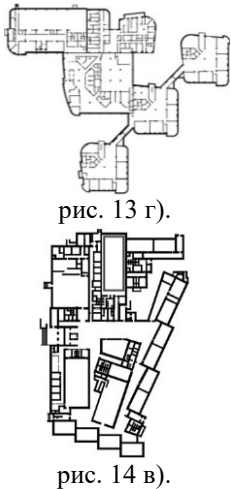
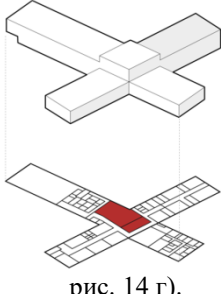
Рис. 15. Здания дополнительного образования детей и школьников, текущий период; а) Православный досуговый центр, Белгород, 2011 г.; б) школьный Кванториум; в) пристройка спортивного блока Вербилковской СОШ, Московская область; г) Luminary центр, Дагестан, сельские поселения, 2019 г.

Таким образом, школьными зданиями с функцией внеурочной деятельности федеративного периода могут считаться здания действующего школьного фонда, который составляют школы разных исторических периодов и этапов. Обеспеченность материально-технической базы для реализации функции внеурочной деятельности у этих объектов разная, в силу того, к какому

времени строительства они относятся и какие уровни модернизации они прошли (если такие работы проводились). Развитие архитектурно-планировочной структуры здания современной школы и ее связь с развитием функции внеурочной деятельности, показана в таблице 3.

Таблица 3

Здания школ федеративного периода (конец XX в.–н.время)

№	Планировочная схема	Виды и формы внеурочной деятельности	Функциональные зоны и группы помещений
I поколение проектов 1992-2011 гг. Капитальный ремонт и реконструкция зданий имперского и советского периодов, индивидуальное проектирование новых школ			
1	Здания УВК предыдущих периодов; новые здания школ (2000-2010).	– физкультурная – познавательная – образовательная – культурно-массовая работа – освоение программ профорientации,	Использование архитектурного наследия предыдущих поколений; зоны внеурочной деятельности в индивидуальных проектах I поколения сохранялись на уровне типовых советских проектов 1980-90х гг.: зона продленного дня, зона студий и кружков, ученического самоуправления.
II поколение проектов 2012-2019 гг. Индивидуальное проектирование новых школ, применение индивидуальных проектов повторного применения, реконструкция зданий			
2	 рис. 13 г). рис. 14 в).	спортивно-оздоровительная (соревнования, спортивные эстафеты, секции, плавание); социальная активность в т.ч. трудовая (волонтерство, участие в поисковых отрядах, общественно-полезный труд, шефская помощь); духовно-нравственная, военно-патриотическое воспитание (посещение выставок, участие в конкурсах, слетах); общеинтеллектуальная (занятия в Квантируме, дополнительные программы IT-технологии, технопарк); общекультурная (занятия в кружках, студиях, конкурсах);	в новых проектах II поколения произошло незначительное увеличение состава помещений для досуга и отдыха (рекреационный центр), биолого-опытнической и художественно-эстетической деятельности
III поколение проектов 2020 гг.–н.время. Проектирование и строительство школ нового поколения. Реновация зданий действующих фондов			
3	 рис. 14 г).	спортивно-оздоровительная социальная активность духовно-нравственная общеинтеллектуальная общекультурная	в новых проектах III поколения здания проектируются с многофункциональным залом-трансформером атриумом с библиотекой и амфитеатром; состав помещений и зон внеурочной деятельности остается недостаточным

Современные особенности и требования к организации внеурочной деятельности в российской школе определены на законодательном уровне, введен термин «внеурочная деятельность», в понятийную сущность которого входит

любая образовательная деятельность, отличная от учебно-урочной деятельности.

Архитектурно-планировочная структура здания школы за все прошедшие периоды и этапы неоднократно была подвергнута эволюционным,

а зачастую революционным изменениям и прошла путь от приспособленных зданий различного назначения до крупных комплексов с развитой функциональной структурой, которая сегодня удовлетворяет требования к организации учебно-урочной деятельности. Однако, для внеурочной деятельности, которая сегодня, наравне с учебно-урочной, является обязательным видом образовательной деятельности, не хватает материально-технических возможностей, что показало проведенное в данной работе исследование. Если ранее архитектурно-планировочная структура здания школы менялась под воздействием изменений в организации учебного процесса и влекла за собой появление новых учебных и общешкольных помещений, то на современном этапе она должна получить новое развитие для выполнения требований к организации внеурочной деятельности.

Многообразие направлений внеурочной деятельности, ее видов и форм проведения, характерное для современной школы, открывает возможности для развития личности обучающихся, позволяет развивать способность применять полученные знания в различных реальных ситуациях; это, в свою очередь, обеспечивает социализацию детей, делая их успешными [2]. Внеурочная деятельность трактует школу, как центр сосредоточения новых знаний, необходимых для современного человека. Традиция дополнительного образования не только детей, но и взрослых, зародившаяся на рубеже XIX–XX вв., сегодня актуальна, как никогда, учитывая, что постиндустриальное общество диктует свои правила, где вызовом является разобщенность различных социальных групп и необходимость формирования единой воспитывающей и развивающей среды. Намечается возврат тех тенденций, которые были актуальны в 1920-е гг., например, использование школ как досуговых и спортивных центров в спальных районах с недостаточно развитой инфраструктурой, наметилась тенденция к укрупнению школ [13].

В настоящее время при проектировании школ используются, как правило сложившаяся объемно-планировочная структура (учебный и общешкольный функциональные блоки) школьного здания, но, по мнению автора, назрела необходимость по-новому посмотреть на архитектуру здания школы, с точки зрения влияния фактора внеурочной деятельности. Внеурочная деятельность выходит на уровень **доминирующего фактора** при создании архитектурных проектов российских школ нового поколения.

Перспективы развития направления полного образовательного комплекса.

На основе изученного опыта современного

школьного строительства можно сделать прогноз по дальнейшему развитию архитектуры современных российских школ и в качестве основного направления предложить формирование типологии образовательных комплексов, оказывающих образовательные услуги в полудневном формате [26].

В работе изучен Белгородский опыт формирования образовательных комплексов полного дня на базе действующих зданий объектов регионального фонда общего образования, на основе которого выявлены тенденции формирования архитектуры полудневных образовательных комплексов. Региональные законодательные документы, связанные с организацией и ведением образовательной деятельности в общеобразовательной школе, основаны на интеграции всех уровней образования, включая дошкольное и дополнительное образование, в единый образовательный комплекс, оказывающий услуги «школы полного дня».

Формирование образовательного комплекса полного дня может быть реализовано по нескольким сценариям: 1) объединение действующих зданий объектов образования разных уровней (дошкольное, школьное образование) в новый объект полудневого ОК с единым центром административного управления (рис.16, а,б); 2) дополнительное наполнение действующих зданий школьного фонда новыми функциями для создания условий организации школы полного дня (рис.16, г); 3) проектирование и строительство зданий общеобразовательных школ нового поколения, предусматривающих функциональные блоки и зоны для внеурочной деятельности и дополнительного образования в школе полного дня (рис.16, д); 4) проектирование и строительство зданий образовательных комплексов нового поколения, объединяющих все ступени образования (дошкольное, школьное) и дополнительное образование, предусматривающих функциональные блоки и зоны для внеурочной деятельности и дополнительного образования в школе полного дня (рис.16, ж).

Необходимо провести донастройку архитектурно-планировочной структуры здания УВН под требования доминирующего фактора внеурочной деятельности. Одним из возможных вариантов решения, автор видит в дополнении сложившейся структуры новым функциональным блоком для внеурочной деятельности и дополнительного образования детей, школьников и взрослых. Это будет особенно актуально при реновации зданий школьных фондов в образовательные комплексы полного дня [26].



Рис. 16. а). МБОУ «Образовательный комплекс «Озерки» им. М. И. Бесхмельницина. Старооскольский район, село Озерки [URL: <https://golnk.ru/bQ6ay>].



Рис. 16. б). Образовательный комплекс «Центр образования №1 г. Белгорода им. Героя Российской Федерации Антона Геннадьевича Копейкина», г. Белгород [URL: <https://golnk.ru/5k1K3>].



Рис.16. в). образовательный комплекс «Слобожанщина» и этнодеревня, с. Колотиловка, Краснояружский район, Белгородская область [URL: <https://krslobozhanshina.gosuslugi.ru/>].

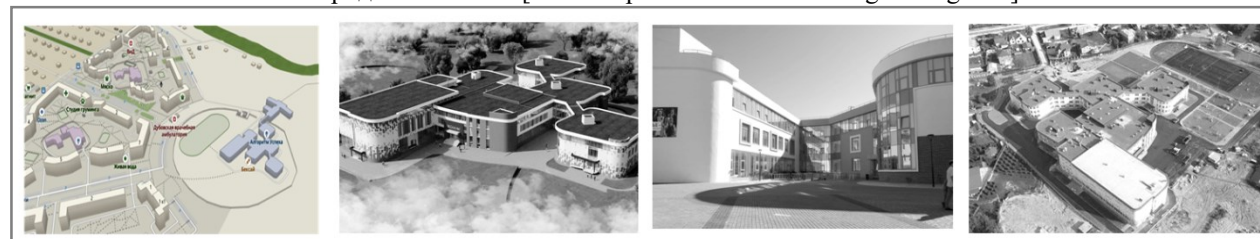


Рис. 16. г). ОГАОУ «ОК «Алгоритм Успеха», п. Дубовое, Белгородская область [URL: <https://golnk.ru/EO1Kr>]



Рис.16. д). СОШ на 1500 мест в п.г.т. Северный, Белгородская область.[URL:<https://golnk.ru/10pR5>].



Рис. 16. д). Образовательный комплекс «ХОРОШКОЛА» авторы «А-проект», арх. А. Дмитриев, Ю. Солдатенкова, К. Назарян, Москва, 2011-2017, 2022 гг.

Выводы

1) Выполнен анализ развития функции внеурочной деятельности в структуре российских зданий УВН для определения исходной точки нового этапа эволюции типологии школьного зда-

ния. Закономерным результатом процесса исторического развития российского школьного образования стало то, что дореволюционная, советская и современная школы сложились в единую систему общего образования Российской Федерации. Внеурочная деятельность присутствовала

на каждом этапе становления системы, но ее содержание, виды и формы менялись под влиянием идеологических, политических и культурных особенностей общества, что находило отражение в архитектуре школьных зданий различных исторических эпох. Сегодня в образовательной деятельности значительно усилена роль внеурочной работы, которая, оказывая доминирующее влияние на ее организацию, требует развития сложившейся архитектурной типологии зданий школ и внедрение новых архитектурных моделей.

2) Систематизация развития архитектуры исторических зданий УВН с конца XVII в. по настоящее время позволила предложить периодизацию исторического процесса формирования функциональных зон внеурочной деятельности в структуре зданий и определить ключевые этапы, связанные с ее особенностями: *в имперский период*, для которого была характерна многотипность школы на основе принципа сословности, это выразилось в том, что здания особых сословных учебных заведений для дворян и других представителей имущих классов располагали материальной базой для развивающих занятий в свободное от уроков время, но такие помещения полностью отсутствовали в учебных заведениях для детей из непривилегированных классов; *в советский период*, который отличает единая концепция народной трудовой школы, это выразилось в создании равных условий для получения общего и дополнительного образования в зданиях школ и внешкольных учреждений для всех школьников страны; *в современной России* школа вернулась к многотипности, к духовной школе, появились новые методики и модели школьного образования, в том числе школа полного дня; внеурочная деятельность входит в образовательный процесс, как обязательное требование государственных стандартов образования. В настоящее время действующие школьные фонды имеют сложную структуру по своему составу, они включают в себя здания завершающего этапа имперского, советского периодов, а также новые здания, построенные в текущий период, что создает неравные материальные-технические условия для ведения внеурочной деятельности в различных образовательных организациях.

3) Выявлены архитектурные объекты-прототипы, которые явились драйверами развития архитектурной типологии зданий УВН, в контексте формирования и развития внеурочной функции на различных исторических этапах. Установлено, что первым объектом общего среднего образования с дополнительными функциями является военно-учебное заведение «Корпус кадетов для шля-

хетских детей» (Санкт-Петербург, 1731г.). Из зданий советской архитектуры прототипом полнодневной школы является «Школа на 10 классов с помещениями групп для продленного дня» – типовый проект № 224-1-114, разработанный ЦНИИЭП учебных зданий авторским коллективом архитекторов под руководством В. И. Степанова в 1968 г. (введен в действие в 1970 г.). В качестве примеров проектов, со сложившимися зонами внеурочной функции в архитектурно-планировочной структуре здания школы, можно привести типовые проекты средних общеобразовательных школ различной вместимости, выполненные в 1985–1986 годах, которые продолжали строить на переходном этапе федеративного периода. На текущем этапе архитектурная организация объекта общего образования с доминирующей функцией внеурочной деятельности ярко прослеживается в образовательном комплексе полного дня «Хорошкола» (г. Москва, 2011-2017, 2022 гг.).

4) На основании проведенных в рамках данной работы комплексных исследований, можно сделать прогноз о том, что наиболее соответствующим запросу государства и общества на современном этапе объектом общего образования является **многофункциональный образовательный комплекс полного дня**. Миссией такого комплекса является создание комфортной образовательной развивающей среды, обеспечивающей формирование социально-активной, конкурентно-способной, образованной личности, для предоставления максимально широкого поля возможностей наибольшему числу обучающихся, ориентированных на высший уровень образования и воспитания, в соответствии с социальным заказом. Сегодня школьный фонд, как в регионах, так и в стране в целом, нуждается в реновации для устранения противоречия между материально-техническими возможностями зданий, которые его составляют и запросом общества к организации современной российской школы, где особое внимание уделяется всестороннему развитию и дополнительному образованию школьников во внеурочное время.

Внеурочная деятельность в современной школе основана на историческом опыте предшествующих периодов и интегрирует в себе весь накопленный опыт по дополнительному развитию детей за рамками учебных программ. Выявленная типология школьных зданий с функциональными зонами для внеурочной деятельности должна стать основой для предложений по формированию архитектурного объекта общего образования нового поколения – образовательного комплекса полного дня, включающего в себя историческое архитектурное наследие школьного строительства в России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон. Об образовании в Российской Федерации от 29 декабря 2012 г. N273-ФЗ:[принят ГД ФС РФ 21. 12. 2012].URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (дата обращения:16. 07. 2025).
2. Пчелинцева Т.С. О внеурочной деятельности в образовательных учреждениях // Вектор науки ТГУ. Серия: Педагогика, психология. 2016. № 3 (26). С. 53–57.
3. Барановский Г.В. Архитектурная энциклопедия второй половины XIX века. Т. 1–7. СПб.: Ред. журн. Строитель, 1902–1908. 732 с.
4. Костина Т.В. Пространство академических гимназий и университета: материалы к истории 1724–1805гг. // Клио. 2013. № 10 (82). С. 6–15.
5. Лингевич О.В. Этапы становления понятия „внеурочная деятельность“ в России // Научно-педагогическое обозрение. Pedagogical review. 2021. №1(35). С.29–32. DOI10.23951/2307-6127-2021-1-29-34.
6. Милютин Д.А. Дневник Д.А. Милютина. 1881-1882. М. : тип. журн. Пограничник, 1950. 4 т. 204 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005582126/?ysclid=mel8g59rz0181262131 (дата обращения: 26.07.2025).
7. Ломоносов М.В. О воспитании и образовании: сборник / Сост.Т. С. Буторина. Академия пед. наук СССР. М.: Педагогика, 1991. 344 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://golnk.ru/ZaQRD> (дата обращения: 26.07.2025).
8. Пилявский В.И. Джакомо Кваренги: Архитектор. Художник. Л.: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1981. 212 с.
9. Поздеев И.И. Десять проектов-типов церковно-приходских школ: школы грамоты, одноклассных, двухклассных и второклассной учительской, с исчислением стоимости постройки школ на 20 -120 учащихся: издание в ознаменование двадцатипятилетия возрождения церковно-приходских школ: (юбилейное издание). Москва: Б. и., 1909. 37 с.
10. Каптерев П. Ф. История русской педагогики. Петроград: тип. В. Безобразова и К° (вл. Н.П.Зандман), 1915. 746 с.
11. Лобанов В. В., Ревякина В. И. Педагогика доктора Пирусского: новаторские опыты оздоровительно-образовательной работы в Сибири конца XIX – начала XXв. / Томск: Изд-во ТГПУ, 2013. 202 с.
12. Былинкин Н.П., Хан-Магомедов С.О., Ковалев А.Ф. и др., под ред. Баранова Н. В. Всеобщая история архитектуры в 12 т. Архитектура СССР, 1917-1970. М.: Стройиздат, 1975. 755 с.
13. Алексеева Н. От экспериментов по переустройству мира до типовых панелей [Электронный ресурс]. URL: <https://prorus.ru/interviews/ot-ehksperimentov-po-pereustrojstvu-mira-do-tipovyh-panelej/> (дата обращения 20.07.2025).
14. Былинкин Н.П., Журавлев А.М., Шишкина И. В., Калмыкова В. Н., Рябушкин А. В., Блохин В. В., Бочаров Ю. П. Современная советская архитектура 1955-1980 гг. Серия: Специальность «Архитектура». М.: Стройиздат, 1978. 224 с.
15. Степанов В.И., Дворкина Е.Б. Новые типы средних общеобразовательных школ с гибкой планировочной структурой. М.: Стройиздат, 1978. 86 с.
16. Верстин Г.И., Пухов В.В. Опыт проектирования и строительства каркасно-панельных школьных зданий: к изучению дисциплины. М.: Стройиздат, 1970. 159 с.
17. Змеул С.Г., Маханько Б.А. Архитектурная типология зданий и сооружений. М.: Архитектура С, 2004. 240 с.
18. Смирнов В.В. Школьное строительство (опыт Ленинграда). Ленинград: Стройиздат: Ленингр. отд-ние, 1982. 198 с.
19. Соловьев А.К., Багратян М.Г. Обзор типовых проектов Школ в СССР // Естественные и технические науки. 2014. №11(89). С. 560–561.
20. Щербина В.М. Становление и развитие сельских учебно-воспитательных комплексов как инновационных образовательных учреждений: 1971-1991гг.: специальность: 13.00.01, дисс.кандидата педагогических наук. 2003. 227 с.
21. Советов С.Е., Сердюковская Г. Н. Гигиенические основы проектирования, строительства и оборудования школ и детских дошкольных учреждений. М.: Медгиз, 1962. 399 с.
22. Принципы построения сети номенклатура типов и зданий на проектирование общеобразовательных школ в условиях сельской застройки на 1970-1980гг. ЦНИИЭП учебных зданий, 1969. 370с.
23. Рекомендации по проектированию зданий сельских общеобразовательных школ для условий РСФСР / Центр. н.-и. и проект. Ин-т по планировке и застройке сел. насел. мест и жилищ. гражд. Стр-ву на селе. М.: Б. и., 1990. 71 с.
24. Ключко А.Р., Коровина Е.И. Развитие архитектуры школьных зданий в России и в мире.// Architecture and Modern Information Technologies. 2017. № 2 (39). С. 98–113.
25. Лебедева Ю.В., Задвернюк Л.В. Школьное образование и архитектура школьных зданий в России сер. XX - нач. XXI вв. // Новые идеи нового века: материалы международной конференции ФАД ТОГУ. 2018. С. 247–251.

26. Чечель И.П. Архитектурно-планировочная структура сельского учебно-воспитательного комплекса – как основа современного образовательного комплекса полного дня // Международная молодежная научная конференция. Курск: ЗАО «Университетская книга». 2024. С. 95–101. DOI: 10.47581/2024.ML-15.Chechel-Ivan-01.

27. Шацкий С.Т. Педагогические сочинения: в 4 т. / под ред. И. А. Каирова [и др.]. Акад. пед. наук РСФСР. М.: Просвещение, 1962–1965. 503 с.

28. Дорошенко С.И., Дорошенко Ю.И. Современные модели школьного образования: учебное пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. 124 с.

29. Бруднов А.К., Калиш И.В. От внешкольной работы к дополнительному образованию детей: сборник нормативных и методических материалов для дополнительного образования детей. М.: ВЛАДОС, 1999. 541 с.

30. Реестр экономически эффективной проектной документации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14803/> (дата обращения: 26.07.2025).

Информация об авторе

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 19.08.2025 г.

© Чечель И.П., 2026

Chechel I.P.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: Golden-line7@yandex.ru

EXTRACURRICULAR ACTIVITIES AS A DOMINANT FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURAL TYPOLOGY OF MODERN SCHOOL BUILDINGS

Abstract. The article considers the formation and development of functional zones of extracurricular activities in the architectural and planning structure of educational buildings of the Russian general education system. Special emphasis is placed on the role of the extracurricular activity function, which has largely determined the current typology of school buildings. The research focuses on the creation of a material and technical base for the organization and conduct of extracurricular activities and its role in the architectural and planning structure of a school building throughout the history of the formation of the Russian general education system. The development of functional zones at different historical stages is analyzed, and a steady trend of expanding extracurricular functions in the structure of modern school buildings is revealed. Today, Russian society has formed a request for general education organizations operating in the modern "full-time school" model, in which extracurricular activities play a decisive dominant role, but currently the implementation of this request is poorly supported by the existing material and technical base, functional and architectural planning structure of existing school buildings. Based on the conducted comprehensive research, the author makes a forecast for the further development of the architectural typology of modern school buildings. As a possible direction for discussion, a proposal is being made to create multifunctional full-day educational complexes with additional functional blocks combining extracurricular activities and additional education for preschoolers, schoolchildren and adult participants in educational communities.

Keywords: educational buildings, extracurricular activities, dominant role, full-time secondary school, full-time educational complex.

REFERENCES

1. Federal Law. On Education in the Russian Federation [Ob obrazovanii v Rossijskoj Federacii]. dated December 29, 2012. N273-FZ:[adopted by the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation on December 21, 2012]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (of treatment:16.07.2025). (rus)

2. Pchelintseva T.S. On extracurricular activities in educational institutions [O vneurochnoj

deyatel'nosti v obrazovatel'ny'x uchrezhdeniyax]. Vector of science TSU. Series: Pedagogy, psychology. 2016. No. 3 (26). Pp. 53–57. (rus)

3. Baranovsky G.V. Architectural Encyclopedia of the Second Half of the 19th Century. Vol. 1-7[Arxitekturnaya e'nciklopediya vtoroj poloviny XIX veka]. [In 7 volumes]. St. Petersburg: Red. Zhurn. The Builder, 1902–1908. 732 p. (rus)

4. Kostina T.V. The Space of Academic Gymnasiums and the University: Materials for the History of 1724-1805 [Prostranstvo akademicheskix

gimnazij i universiteta: materialy k istorii 1724–1805gg.]. Klio 2013. No. 10 (82). Pp. 6–15. [Electronic resource]. URL: [http:// ranar.spb.ru/files/visual...Kostina_gymnasium.pdf](http://ranar.spb.ru/files/visual...Kostina_gymnasium.pdf) (date of treatment: 26.07.2025). (rus)

5. Lingevidh O.V. Stages of the Formation of the Concept of “Extracurricular Activities” in Russia [E'tapy stanovleniya ponyatiya „vneurochnaya deyatel'nost'“ v Rossii]. Scientific and Pedagogical Review. Pedagogikal reviev. 2021. No. 1(35). Pp. 29–32. DOI10.23951/2307-6127-2021-1-29-34. (rus)

6. Milyutin D.A. D.A. Milyutin's Diary. 1881–1882. [Dnevnik D.A. Milyutina]. Moscow: Border Guard Magazine, 1950. 4 Vol. 204 p. (rus). [Electronic resource]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005582126/?ysclid=mel8g59rz0181262131 (date of treatment: 26.07.2025). (rus)

7. Lomonosov M.V. On Education and Training [O vospitanii i obrazovanii] : [Collection]. Compiled by T. S. Butorina. USSR Academy of Pedagogical Sciences. Moscow: Pedagogika, 1991. 339 p. [Electronic resource]. URL: <https://web.archive.org/web/20121225045758/http://ushinskiy.ru/jspui/bitstream/123456789/93/1/lomonosov.pdf> (date of treatment: 26.07.2025). (rus)

8. Pilyavsky V.I. Giacomo Quarenghi: Architect. Artist [Dzhakomo Kvarengi: Arxitektor. Xudozhnik]. L.: Stroyizdat. Leningrad Branch, 1981. 212 p. (rus)

9. Pozdeev I.I. Ten Projects-Types of Parish Schools: Literacy Schools, One-Class, Two-Class, and Two-Class Teacher's Schools, with Estimates of the Cost of Building Schools for 20-120 Students: Published to Commemorate the Twenty-Fifth Anniversary of the Revival of Parish Schools: (Anniversary Edition) [Desyat' proektov-tipov cerkovno-prihodskix shkol: shkoly' gramoty', odnoklassny'x, dvuklassny'x i vtoroklassnoj uchitel'skoj, s ischisleniem stoimosti postrojki shkol na 20-120 uchashhixsya: izdanie v oznamenovanie dvadcatipyatiletiya vozrozhdeniya cerkovno-prihodskix shkol: (yubilejnoe izdanie)]. Moscow: b. i., 1909. 37 p. (rus)

10. Kapterev P.F. History of Russian Pedagogy [Istoriya russkoj pedagogiki]. Petrograd: V. Bezobrazov and Co. (owned by N.P. Zandman), 1915. 746 p. (rus)

11. Lobanov V.V., Revyakina V.I. Pedagogy of Dr. Pirusky: innovative experiments Health and educational work in Siberia at the end of the XIX - beginning of the XX century. [Pedagogika doktora Pirusskogo: novatorskie opyty' Ozdorovitel'no-obrazovatel'noj raboty' v Sibiri konca XIX – nachala XXv.]. Tomsk: Publishing house of TSPU. 2013. 202 p. (rus)

12. Bylinkin N.P., Khan-Magomedov S.O., Kovalev A.F. and others, ed. Baranova N.V. General

History of Architecture. Volume 12. Book 1. Architecture of the USSR [Vseobshhaya istoriya arxitektury. Tom 12. Kniga 1. Arxitektura SSSR]. M.: Stroyizdat, 1975. 756 p. (rus)

13. Alekseeva N.A. From experiments on the reconstruction of the world to standard panels [Ot e'ksperimentov po pereustroystvu mira do tipovy'x panelej] [Electronic resource]. URL: <https://pro-rus.ru/interviews/ot-ehksperimentov-po-pereustroystvu-mira-do-tipovyh-panelej/> (date of treatment: 20.07.2025). (rus)

14. Bylinkin N.P., Zhuravlev A.M., Shishkina I.V., Kalmykova V.N., Ryabushkin A.V., Blokhin V.V., Bocharov Yu.P. Modern Soviet Architecture 1955-1980 [Sovremennaya sovetskaya arxitektura 1955-1980 gg]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 224 p. (rus)

15. 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 planirovochnoj strukturoj]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 86 p. (rus)

16. Verstin G.I. Experience in the design and construction of frame-panel school buildings [Opy't proektirovaniya i stroitel'stva karkasno-panel'ny'x shkol'ny'x zdaniy]: to the study of the discipline. M.: Stroyizdat, 1970. 159 p. (rus)

17. Zmeul S.G., Makhan'ko B.A. Architectural Typology of Buildings and Structures [Arxitekturnaya tipologiya zdaniy i sooruzhenij]. M.: Architecture – S. 2004. 240 p. (rus)

18. Smirnov V.V. School Construction (Experience of Leningrad) [Shkol'noe stroitel'stvo (opy't Leningrada)]. Leningrad: Stroyizdat: Leningr. otdnie, 1982. 198 p. (rus)

19. Solovyov A.K., Bagratyan M.G. Overview of Standard School Projects in the USSR [Obzor tipovy'x proektov Shkol v SSSR]. Natural and Technical Sciences. 2014. No. 11(89). Pp. 560–561. (rus)

20. Shcherbinina V.M. Formation and Development of Rural Educational Complexes as Innovative Educational Institutions [Stanovlenie i razvitie sel'skix uchebno-vospitatel'ny'x kompleksov kak innovacionny'x obrazovatel'ny'x uchrezhdenij]: 1971-1991: Specialty: 13.00.01, Candidate of Pedagogical Sciences Thesis. 2003. 227 p. (rus)

21. Sovetov S.E., Serdyukovskaya G.N. Hygienic foundations of design, construction and equipment of schools and preschool institutions [Gigienicheskie osnovy' proektirovaniya, stroitel'stva i oborudovaniya shkol i detskix doshkol'ny'x uchrezhdenij]. Moscow: Medgiz, 1962. 399 p. (rus).

22. Principles of network construction, nomenclature of types and buildings for the design of secondary schools in rural areas for 1970-1980 [Principy' postroeniya seti nomenklatura tipov i zdaniy na proektirovanie obshheobrazovatel'ny'x shkol v

usloviyax sel'skoj zastrojki na 1970-1980gg.]. Plan of the Research Institute of Central Research Institute of Educational Buildings. 1969. 370 p. (rus)

23. Recommendations for the design of buildings of rural secondary schools for the conditions of the RSFSR [Rekomendacii po proektirovaniyu zdaniy sel'skix obshheobrazovatel'ny'x shkol dlya uslovij RSFSR]. Center. n. –I. and the project. institute for planning and building of villages. villages. places and dwellings. – civil construction in rural areas. Moscow: B. i., 1990. 71p. (rus)

24. Klochko A.R., Korovina E.I. Development of the Architecture of School Buildings in Russia and in the World [Razvitie arkhitektury` shkol`ny`x zdaniy v Rossii i v mire]. Architecture and Modern Information Technologies. 2017. No. 2 (39). Pp. 98–113. (rus)

25. Lebedeva Yu.V., Zadvernyuk L. V. School education and architecture of school buildings in Russia. XX - the beginning. XXI century [Shkol'noe obrazovanie i arkhitektura shkol'ny'x zdaniy v Rossii ser. XX - nach. XXI vv.]. New ideas of the New century: proceedings of the International Conference of the Faculty of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences. 2018. Pp. 247–251. (rus)

26. Chechel I.P. Architectural and planning structure of a rural educational complex as the basis

of a modern full-time educational complex [Arkhitekturno-planirovochnaya struktura sel'skogo uchebno-vospitatel'nogo kompleksa – kak osnova sovremennogo obrazovatel'nogo kompleksa polnogo dnya]. International Youth Scientific Conference. Kursk: CJSC "University Book".2024. Pp. 95–101. DOI 10.47581/2024.ML-15.Chechel-Ivan-01. (rus)

27. Shatsky S.T. Pedagogical Works [Pedagogicheskie sochineniya] : In 4 Volumes. Edited by I. A. Kairova [et al.]. Academy of Pedagogical Sciences of the RSFSR. Moscow: Prosveshchenie, 1962-1965. 503 p. (rus)

28. Doroshenko S.I., Doroshenko Yu.I. Modern models of school education [Sovremennyye modeli shkol'nogo obrazovaniya] : a textbook. Vladimir : Publishing House of the All-Russian State University, 2017. 124 p. (rus)

29. Brudnov A.K. From extracurricular work to additional education [Ot vneshkol'noj raboty` k dopolnitel'nomu obrazovaniyu detej]. A collection of regulatory and methodological materials for additional education for children. Moscow: VLADOS, 1999. 541 p. (rus)

30. Register of cost-effective project documentation. [Electronic resource]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14803/> (date of treatment: 26.07.2025). (rus)

Information about the author

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. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 19.08.2025

Для цитирования:

Чечель И.П. Внеурочная деятельность, как доминирующий фактор развития архитектурной типологии современных школьных зданий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 53–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-53-74

For citation:

Chechel I.P. Extracurricular activities as a dominant factor in the development of the architectural typology of modern school buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 53–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-53-74

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-75-85

Ткаченко С.Г.*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: archtkachenko@yandex.ru

СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА РЕВИТАЛИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Аннотация. В постиндустриальную эпоху бывшие промышленные территории стали, с одной стороны, проблемными депрессивными участками многих городов, а с другой – стратегически важными точками потенциального развития городской инфраструктуры. В данной статье автор рассматривает опыт ревитализации индустриальных ландшафтов в современные общественные пространства, городские парки и музеефицированные территории. Освещается необходимость преобразования бывших промышленных территорий для повышения уровня жизни горожан и развития городской инфраструктуры. Раскрывается понятие «индустриального ландшафта» в архитектурно-ландшафтной практике. Проводится анализ шести реализованных проектов, на основе которых определяются основные принципы ревитализации индустриальных ландшафтов: сохранение ценных объектов архитектурно-ландшафтной среды, создание уникального символического образа местности на основе акцентирования визуальных и смысловых доминант, развитие функциональной и транспортно-пешеходной схемы преобразуемой территории с учетом различных сценариев использования, улучшение экологического состояния территории, обоснование экономической целесообразности преобразований за счет максимально возможного использования сохранившихся объектов исторической среды. Практика преобразования и устойчивого развития промышленных ландшафтов создает базу для формирования и использования новых подходов и приемов в работе с историческими индустриальными территориями для решения идентификационных, градостроительных, архитектурно-планировочных, экологических и экономических задач.

Ключевые слова: индустриальное наследие, индустриальный ландшафт, ландшафтная архитектура, ревитализация, устойчивое развитие, благоустройство.

Введение. История возникновения и развития многих современных городов и поселений тесно связана с эпохой индустриализации и развитием региональной промышленности. С приходом парадигмы постиндустриального общества, под влиянием экономических, политических и социальных изменений, развития технологий и ориентации на наукоемкие производства, многие индустриальные территории утратили своё значение [1]. Следы промышленной деятельности человека как в виде отдельных сооружений, так и в виде целых заводских комплексов и антропогенных ландшафтов оказались рядом с существующими селитебными территориями, а иногда и вовсе вплетенными в плотную городскую ткань. Несмотря на историческую ценность индустриальных территорий, бывшие промышленные комплексы оставили после себя местности с градостроительными, экологическими и эстетическими проблемами, которые современные специалисты в области архитектуры, градостроительства, дизайна и ландшафтоведения призваны решить. Сложность данной задачи заключается в разработке комплексной стратегии преобразования и развития исторических индустриальных ландшафтов, привлечении специалистов из большого количества разных сфер деятельности, ведь объём и спектр работ на подобных про-

ектах очень широк. Здания и сооружения, расположенные на преобразуемой территории, перефигурируются и адаптируются к современным нуждам и потребностям общества [2]. Проекты по ревитализации индустриальных ландшафтов помимо сохранения исторической ценности территории и идентичности её жителей включают в себя улучшение экологического состояния участка и восстановление его экосистемы, формирование инфраструктуры для жизни и отдыха людей, включая возведения жилья, мест проведения досуга, культурных площадок, музейно-выставочных комплексов [3, 4]. Все это должно создать благоприятную среду для жизнедеятельности горожан и привлечь дополнительные инвестиции, чтобы старые промышленные центры «задышали» новой жизнью [5]. Собственно, именно этот смысл и вкладывается в понятие ревитализации территории. Стоит также обратить внимание на то, как трактуется «индустриальный ландшафт» в современной архитектурно-ландшафтной практике, и какие объекты входят в это понятие. С точки зрения Международного комитета по сохранению индустриального наследия (TICCIH) индустриальный ландшафт – это разнообразность культурного ландшафта, преобразованного производственной деятельностью человека, которые рассматривается с двух основных пози-

ций: визуальной панорамы, восприятие ландшафта в качестве своеобразного художественного произведения, пейзажа с ярким акцентом на индустриальный характер местности, и географического объекта, чья структура может быть изучена и проанализирована [6]. В свою очередь исследователь-ландшафтовед Тютюнник Ю.Г. связывает понятия промышленного и культурного ландшафта, объясняя возникновение ценности среды индустриальной территорий за счет формирования промышленной архитектуры, которая внедряет «в техногенный покров промплощадки, промзоны, промцентра иррациональный художественный момент» [7]. Таким образом, индустриальный ландшафт в архитектурно-ландшафтной практике – это сложное понятие, которое лежит на пересечении архитектурной, географической и культурологической наук, и обозначает исторически сложившуюся под влиянием промышленной деятельности человека территорию, объединяющую природные компоненты среды (климатические условия, естественный рельеф местности, флора), объекты производственной деятельности (здания, сооружения, механизмы, антропогенные ландшафтные объекты), а также визуальные, экологические и социокультурные связи между данными элементами.

Методика. В качестве объектов исследования выбраны промышленные территории, преобразованные в конце XX – начале XXI века в современные общественные пространства, городские парки, пешеходные маршруты, музеефицированные территории. Исследование основано на системном анализе изменений архитектурно-планировочной организации, транспортной сети и ландшафтной структуры исторического состояния рассматриваемых территорий. Для оценки существующего состояния объектов исследования используются фотографии, информация и геоданные из открытых источников. Основной целью исследования является обобщения подходов и определение приемов, которые используются в современной практике ревитализации и устойчивого развития индустриальных ландшафтов.

Основная часть.

Парко Дора в Турине, Италия. Проект парка в северо-западной части Турина на 35 га был разработан в 2004 году одной из самых авторитетных компаний в области градостроительного планирования и ландшафтного дизайна Latz + Partner, которая в 1990-е годы спроектировала иконический проект ландшафтного парка Дуйсбург Норд в Рурском регионе, одним из первых сформировавший представление о комплексном преобразовании бывшей индустриальной территории в огромный городской парк на 200 га [8].

Концепция ревитализации включает в себя трансформацию бывших промышленных зон в систему связанных озелененных городских пространств с сохранением объектов индустриального прошлого и создание пешеходной среды вдоль реки Дора [9].

Парк состоит из пяти зон:

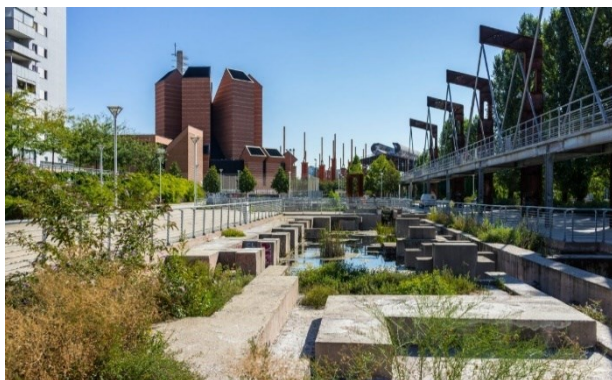
1. Ингест (рис. 1а). Самая западная зона представляет собой парк с водяными садами, разбитыми на фундаментах зданий бывшего ламинарирующего завода и примыкающими с севера к жилой застройке и современному католическому храмовому комплексу Санта Вольта архитектора Марио Ботта, которому помимо строительства новых зданий удалось сохранить трубу сталелитейного завода и преобразовать её в колокольню [10]. Из этой зоны на базе сохранившихся металлических конструкций организован надземный пешеходный переход в следующую часть парка.

2. Витали (рис. 1б). Огромная конструкция зала бывшего сталелитейного завода Витали, образует уникальный центр парка. После демонтажа внешней оболочки части заводского корпуса, 30-метровые красные стальные колонны образовали своеобразный футуристичный упорядоченный лес. Пышная растительность и общественная жизнь «захватили» искусственную среду, а огромные бетонные башни и фундаменты превратились в игровые площадки. Часть корпуса, сохранившая конструкции покрытия, была приспособлена для проведения различных мероприятий. На востоке зона Витали ограничена бетонной стеной нового дорожного туннеля, а примыкающая зона тихого парка Мортара расположена на уровне выше парка Витали, что функционально разделяет функциональные зоны парка, при этом формируя безопасную многоуровневую пешеходную среду. Бетонные шламовые бассейны на севере участка теперь содержат чистую воду и являются частью системы управления ливневыми водами, которая собирает дождевую воду с крыш и поверхностей парка и хранит ее в бассейнах и цистернах. Световая инсталляция проецирует игру волн на стены данного сооружения и превращает промышленные памятники в привлекательные достопримечательности. На юге вдоль реки Дора высажены высокие деревья, создающие приятный теневой променад.

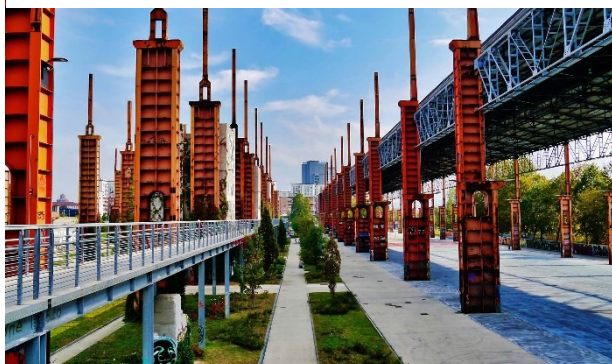
3. Мортара. Озелененная территория, обрамляющая зону Витали с востока.

4. Мишлен (рис. 1в). Участок бывшего завода Мишлен был превращен в просторный луговой парк, отличающийся своим ландшафтом и топографией. Падение рельефа в сторону севера, к реке Дора, обеспечивает хорошие визуальные характеристики на юге участка на весь парк. Тропа вдоль реки организует доступ к воде, а

стальные надземные мосты пересекают бассейн реки и соединяются с пешеходным мостом к зоне Витали на противоположном берегу. Ряды разных видов деревьев высажены на пологих склонах рельефа и обеспечивают теневые участки.



а (Фото: <https://meeters.org/event/un-inferno-trasformato-in-paradiso-il-parco-dora-a-torino?date=&category=experience>)



б (Фото: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Torino_Parco_Dora_3.jpg)

Главной визуальной доминантой, к которой ведет основной центральный пешеходный путь зоны, выступает бетонная градирия на юго-западе парка, которая в вечернее время становится завораживающей световой и звуковой скульптурой.



в (Фото: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parco_Dora_Lotto_Michelin_-_panoramio.jpg)



г (Фото: <https://www.quotidianopiemontese.it/2021/06/25/parco-dora-torino-aperti-al-pubblico-il-lotto-valdocco-nord-e-iron-valley/>)

Рис. 1. «Parco Dora», г. Турин, Италия

5. Вальдоко (рис. 1г). В данной зоне территория сталелитейного завода Fiat простиралась прямо над рекой Дора. В ходе ревитализации бетонная плита над Дорой была демонтирована, но при этом были сохранены береговые стены, вдоль которых был организован променад. На территории были высажены множество деревьев, обеспечивающих тенистые пространства для разнообразных занятий. Пешеходные дорожки, возведенные на старом основании, соединяют северный берег Вальдоко с южным. Южный участок Вальдоко был достроен в 2011 году и, в соответствии с Киотским протоколом, был реализован с нулевым уровнем выброса углерода.

Стил Стакс в Бетлехеме, США. Историческая территория сталелитейного завода компании Бетлехем Стил (1857–2003 гг.) в Бетлехеме в США является ярким примером ревитализации индустриального наследия в небольшом городе с населением около 75 700 жителей (по данным на 2020 год) [11]. Ландшафтные архитекторы из

компании WRT в 2015 году превратили депрессивную промышленную зону в современное многофункциональное озелененное общественное пространство университетского кампуса (рис. 2а). Одна из главных проблем поврежденного ландшафта заключалась в больших участках почвы с низкой водопроницаемостью, которые приводили к образованию обширных микроводоёмов, луж. В связи с этим были демонтированы части существующих фундаментов зданий и сооружений, непроницаемый почвенный покров был заменен на проницаемый. Было произведено озеленение территории, высажены газоны и растения, что увеличило биомассу и, как следствие, улучшило экологическую ситуацию на участке [12]. Несмотря на то, что кампус представляет собой единое пространство, отдельные зоны были спроектированы таким образом, чтобы обеспечить разнообразие и гибкость различных сценариев. Была скорректирована транспортная схема для создания озелененной площади-амфитеатра с павильоном Левитта для проведения культурных

мероприятий и концертов (рис. 2б). Были также запроектированы места для семейного пикника и игровая площадка. Особый интерес представляет эстакада Гувера-Мейсона, которая была интегрирована в пешеходный маршрут за счет возведения вдоль неё надземной пешеходной дорожки из металлических конструкций с бетонными кадка-ми для местных растений (рис. 2в). Более того, на протяжении данного пешеходного маршрута расположены вывески с информацией об истории сталелитейной промышленности региона и открываются виды на заводские сооружения. Ве-

черная подсветка акцентирует внимание на металлических доменных печах, как на главной визуальной и символической доминанте местности, олицетворяющей эпоху индустриального бума небольшого американского города. Стил Стакс в Бетлехеме представляет собой новую типологию ландшафта для небольших постиндустриальных городов, что не только вносит вклад в масштабное экономическое возрождение бывшего фабричного города, но и служит ярким примером вновь открытой экономической и социальной ценности для аналогичных территорий Ржавого пояса США.



Рис. 2. «Steel Stacks Arts + Cultural Campus», г. Бетлехем, США
(Фото: <https://landezine.com/bethlehem-steelstacks-arts-culture-campus-by-wrt/>)

Вестпарк в Бохуме, Германия. История преобразования бывшего сталелитейного завода началась в 1989 году. Расположенный в непосредственной близости от центра города Бохум, заброшенный участок земли в 35 га был приобретен Государственной корпорацией развития (LEG) Северного Рейна-Вестфалии и интегрирован в Международную строительную выставку Эмшер Парк. Концепция, разработанная рабочей группой Westpark в 1997 году, легла в основу текущего дизайна участка. Парковый ландшафт на трех уровнях развивался вокруг расположенного

в центре Jahrhunderthalle, бывших производственных корпусов, которые стали центром для проведения культурных мероприятий (рис. 3а). Различные уровни рельефа создали пространства с разными видовыми характеристиками, плотностями посадок и ландшафтами. После закрытия заводов осталась промышленная пустошь, террасированная железнодорожными насыпями и свалками. Подпорные стенки и шлаковые отвалы, покрытые дикой растительностью, доминировали в ландшафте (рис. 3б). С самого верхнего уровня парка открывается вид на городские

районы и достопримечательности региона. Вокруг парка проходит кольцевая пешеходная дорожка длиной 1,5 км. Были высажены рощи из берез и белых акаций. Кусты бабочек и травянистые многолетние растения дополняют создан-

ную дикую природу внутри города. Переосмысление и сохранение «постиндустриальной природы» было ключевой целью дизайна. Парк развивался в несколько этапов, последний этап был завершен к концу 2015 года [13].



а (Фото: https://www.bochum-tourismus.de/media/_processed_/c/f/csm_Westpark_Jahrhunderthalle_Heliflug_6977654332.jpg)



б (Фото: <https://www.architektur-bildarchiv.de/image/Westpark-Bochum-7358.html>)

Рис. 3. Westpark, г. Бохум, Германия

Вудагемаал в Леммере, Нидерланды. Действующая паровая насосная станция Ваудагемаал (Woudagemaal) в Леммере является подлинным объектом культурного наследия ЮНЕСКО и представляет собой комплекс действующих сооружений и части антропогенного ландшафта, созданные голландскими инженерами и архитекторами в 1920 году для предотвращения затопления низменности провинции Фрисландия. Насосная станция с котельной, дымовой трубой и угольным складом получили охранный статус в 1988 году. В 2011 году на небольшом расстоянии к западу от объекта культурного наследия, но в границах защитной зоны, был построен туристический центр, предоставляющий информацию о станции, необходимые удобства, а также постоянную экспозицию на тему «Пар и вода» [14]. Несмотря на предмет охраны Вудагемаал как с точки зрения исторической и технологической ценности, так и с точки зрения визуального восприятия архитектурного объекта в сложившейся среде архитекторам студии J.O.N.G Architecten удалось деликатно вписать музейно-туристический павильон в охраняемый ландшафт. Одноэтажная постройка схожа со станцией по пропорции, но выполнена в современном модернистском стиле с отделкой из металла и стекла стоит на бетонных ножках в воде [15]. От музея к озелененному холму охраняемого ландшафта ведет металлический мост. Такой подход сомасштабности исторического и современного объёмов, интеграции новых построек в существующий рельеф и контраст материалов позволяют акцентировать и сохранить визуальное восприятие ценного объекта в исторической среде, создав при

этом необходимую инфраструктуру и новый, современный слой в составе музеефицированной территории (рис. 4).



Рис. 4. Woudagemaal, г. Леммер, Нидерланды
(Фото: <https://www.waterlandvanfriesland.nl/de/routen/2587522922/wasser-erlebnisroute-wasser-hotspots-friesland>)

Мэйфилд парк в Манчестере, Великобритания. Ландшафтные архитекторы из Studio Egret West трансформировали в 2022 году заброшенную территорию бывших депо и складов площадью 2,63 га в биоразнообразную парковую зону (рис. 5а). Открытие реки Медлок, которая была «спрятана» в коллектор, стало ключом к формированию важной природной составляющей нового парка, а создание разнообразия среды в одном пространстве поспособствовало зарождению новой экосистемы, которая стала домом для множества рыб, птиц и растений [16]. Была сохранена историческая береговая линия с исконной подпорной каменной стеной реки Медлок, а генеральный план парка был разработан с

учетом существующего рельефа, чтобы свести к минимуму перепрофилирование участка (рис 5б). В соответствии с проектом в парке были высажены 63 000 растений, луг с дикими цветами, декоративные травы и 140 деревьев (40 различных видов), которые способны перерабатывать до 3 тонн CO_2 ежегодно. Мэйфилд парк отличается натуралистичным дизайном посадок, который может адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям. Дизайн включает последовательности различных растительных композиций, грядки и луговины, для создания ощущения путешествия, сменяемости пейзажа (рис. 5г). В более засушливых районах выбор растений учитывает их устойчивость, основанную на топографии и солнечном воздействии. Большая насыпь, обращенная на юг, вдохновлена железными дорогами, прилегающими к участку, и является интерпретацией засухоустойчивой среды, встречающейся вдоль железнодорожных путей. В то же время, проект учитывает сценарий повышения уровня реки Медлок вплоть до максимального уровня, достигнутого за последние 100 лет. В районах, предназначенных для борьбы с паводковыми водами и сильными речными потоками, природные системы перехватывают и замедляют сброс воды, а также стимулируют эвапотранспирацию (суммарное количество влаги, удаляемой в результате испарения и транспирации). Напри-

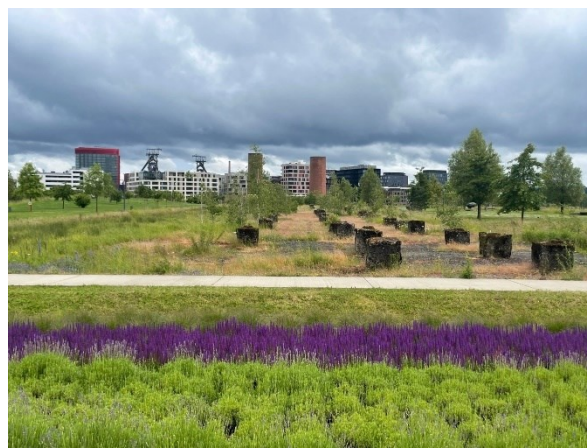
мер, в дождевых садах высажены влагоустойчивые растения, которые поглощают излишки поверхностного стока, препятствуя наводнению реки. Помимо создания прибрежных речных берегов и луговины, были намеренно внедрены и другие элементы биоразнообразия среды для поощрения диких животных: каменные пороги, каменная наброска, 140 новых полувзрослых деревьев различных видов, различные скворечники, гнездовые туннели, зимние спячки, большая зона дикой природы для смягчения наводнений, заполненные водой скрепы, груды камней и бревен, а также продуманный подход к освещению, который сводит к минимуму проникновение света в зону бассейна реки. Ключевым шагом с точки зрения экономичности преобразования участка стало повторное использование исторических чугунных балок из водопропускной трубы для различных новых мостов на участке. Данный подход одновременно сохранил исторические артефакты участка и оказался экономически выгодным, сократив затраты на производство 36-ти тонн стальных конструкций. Необычная детская игровая площадка включает в себя горку через реку Медлок, туннели, отсылающие к местным железнодорожным аркам, и шесть игровых башен, отражающих индустриальное прошлое места (рис. 5в). На территории также были организованы площадки для спорта, мероприятий и игр.



Рис. 5. Mayfield Park, Манчестер, Великобритания
(Фото: <https://studioegretwest.com/places/mayfield-park>)



а



б

Рис. 6. Parc Belval, г. Белвал, Люксембург
(Фото: <https://landezine.com/parc-belval-sud-by-agence-ter/>)

Парк Белвал, Люксембург. С 2008 года компания Тер в Карлсруэ работает над преобразованием территории бывшей сталелитейной промышленности на юге Люксембурга. Эта территория является частью большой пространственной системы, состоящей из терриконов, топографических склонов и естественных и искусственных водотоков (рис. 6а) [17]. Парк площадью 9,4 га расположен в центре района застройки на территории экстрактивного индустриального ландшафта, сформированного в локусе интенсивной металлургической промышленности, и объединяет новые строящиеся кварталы [18]. История этого места и немногочисленные сохранившиеся артефакты промышленного использования сохраняются и экспонируются. С точки зрения топографии наиболее важным элементом является характерный контур линии склона в форме S-образного изгиба. Он формирует ландшафт, разделяя его на верхнее плато и нижнюю часть парка. Отсюда открываются важные визуальные ориентиры и пути, ведущие к соседним районам. Дизайн парка органично сочетает в себе исторические элементы с современной пространственной реорганизацией. Парк разделён на линейные сады, соединённые аллеями, рядами деревьев и дорожками, благодаря чему каждый сад выделяется и остаётся независимым (рис. 6б). Например, в дизайне исторического сада используется едва заметная растительность промышленной зоны, а существующая, сильно уплотнённая почва из шлака и шлакового песка остается нетронутым и консервируется, как часть исторической среды. Границы между парком и его окрестностями спроектированы таким образом, чтобы парк был открыт со всех сторон. На севере Сад каналов образует порог, который чётко обозначает вход в парк. Сад каналов играет с цветами и формами, напоминая о воде и её огромном влиянии на ландшафт. Его русло повторяет русло

протекающего под ним ручья Веншельбах. Променад, идущий параллельно каналу Жарден, приводит посетителей парка к смотровой площадке на северном конце склона, откуда открывается вид на Веншельбах и окрестности напротив. Из-за существующей геологической ситуации и того, что раньше здесь была свалка, дренажная система парка требует особой концепции. Для этого используются желоба, канавы и каскады, которые начинаются на плато, пересекают дельту и заканчиваются водными ступенями. Такой подход делает круговорот воды видимым для посетителей. С помощью дизайна создаются новые пространства со своей собственной атмосферой, такие, как канал Жарден и Дельта, которые одновременно являются элементами и дизайна, и гидрологии. Проект на данный момент реализуется в несколько этапов. Парк разрастается вместе с развитием прилегающих районов, создавая контраст между открытым пространством и новыми застроенными районами. Каждый этап расширения отвечает новым требованиям и потребностям жителей. Парк – это динамичное пространство, которое адаптируется к потребностям растущего города и в долгосрочной перспективе способствует повышению качества жизни в Белвале.

Выводы. Рассмотрев практику ревитализации и устойчивого развития индустриальных ландшафтов, можно выделить следующее:

1. Современные проекты ревитализации индустриальных ландшафтов призваны создать современную и комфортную городскую среду на промышленных территориях, утративших свое функциональное значение, и при этом сохранить и интегрировать ценные исторические архитектурно-ландшафтные объекты в преобразованное пространство.

2. Сохранение и экспонирование визуальных и смысловых доминант формирует идентичность

местности и создает запоминающийся символический образ.

3. Формирование продуманной транспортно-пешеходной сети на ревитализируемой территории позволяет вписать некогда рудиментальные участки в городскую инфраструктуру.

4. Необходимость в экореконструкции, включающая в себя ряд мер по восстановлению поврежденных ландшафтов и природного компонента среды. Восстановление почвенного покрова и озеленение используются для улучшения экологического состояния территории, а также повышения эстетической привлекательности и создания «позитивного», здорового образа территории для посетителей. Формирование посадок из местных и специально подобранных растений, способных выдерживать климатические условия региона, способствуют поддержанию экосистемы [19].

5. Немаловажным аспектом проекта ревитализации является экономическая целесообразность. Во многом, этот принцип согласуется с концепцией сохранения и повторного использования зданий, сооружений и ландшафтов, поскольку снижаются затраты на производство и возведение новых конструкций. Более того, формирование многофункциональной инфраструктуры территории способно повысить туристическую активность поселения и привлечь дополнительные инвестиции, что в целом обеспечит устойчивое развитие места [20].

В качестве вывода можно сформулировать ряд возможных подходов к ревитализации промышленных ландшафтов:

1. Сохранение индустриального ландшафта с минимальной интеграцией новых объектов инфраструктуры для организации современных функций. Данный подход характерен для ценных исторических индустриальных ландшафтов и объектов культурного наследия.

2. Частичное сохранение ценных средовых объектов индустриального ландшафта с интеграцией современных объектов инфраструктуры.

3. Полное преобразование индустриального ландшафта с минимальным сохранением объектов промышленного наследия. Как правило, данный подход наиболее целесообразен к экстрактивным ландшафтам, расположенным в черте города, которые требуют значительной экореконструкции для формирования здоровой и комфортной среды для горожан и жителей прилегающей селитебной территории.

Среди современных приемов ревитализации промышленных ландшафтов можно выделить:

1. Экспонирование. К примеру, металлические доменные печи в Steel Stacks или конструкции бывшего цеха Parco Dora.

2. Интерпретация. Например, использование отвалов в качестве части пешеходных маршрутов.

3. Интеграция. Данный прием можно разделить на интеграцию объектов современной архитектуры в историческую охраняемую среду для акцентирования ценных объектов среды, и интеграцию объектов, имитирующих исторические материалы и формы среды, подчеркивающие специфику исторической промышленной территории.

4. Экореконструкция. Восстановление поврежденной природы и формирование экосистемы для устойчивого развития территории.

Таким образом, анализ современной практики преобразования бывших промышленных территорий формирует базу для расширения современных подходов и приемов ревитализации и формирования устойчивого развития индустриальных ландшафтов с учетом сохранения ценной исторической среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованова Е.В. Прогностический потенциал теории постиндустриализма Д. Белла // Вестник славянских культур. 2013. № 4(30). С. 11–17.
2. Цепилова О.П. Анализ опыта повторной адаптации промышленной архитектуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 12. С. 74–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90.
3. Алексеева Е.В. Современная конверсия исторически сформировавшихся индустриальных ландшафтов в угледобывающих регионах: проблемы и решения // Вестник Донецкого национального университета. Серия Б: Гуманитарные науки. 2021. № 3. С. 7–12.
4. Ткаченко С.Г., Гранстрем М.А., Лавров Л.П., Штиглиц М.С. Специфика формирования ландшафта исторических промышленных предприятий Прикамья // Жилищное строительство. 2025. № 1–2. С. 68–73. DOI: 10.31659/0044-4472-2025-1-2-68-73.
5. Алексеева Е.В. Индустриальное наследие городов-заводов: зарубежные подходы к изучению, сохранению, использованию // Актуальные проблемы изучения исторических городов-заводов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Ижевск, 22–23 сентября 2020 года. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук». 2020. С. 12–19.

6. Stuart I. Identifying industrial landscapes // TICCIH guide to industrial heritage conservation. Industrial heritage re-tooled. Edited by J. Douet. Lancaster: Carnegie Publishing, 2012. P. 48–54.
7. Тютюнник Ю.Г. Ландшафты промышленных территорий: место в культуре, предмет исследования, проблемы терминологии и смысла // Географический вестник. 2020. № 1(52). С. 42–59.
8. Сайт Latz + Partner. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.latzundpartner.de> (Дата обращения: 24.06.2025)
9. Landezine: Parco Dora. [Электронный ресурс]. URL: https://landezine.com/parco-dora-latz-partner-landscape_architecture/ (Дата обращения: 24.06.2025).
10. Сайт Mario Botta Architectti. [Электронный ресурс]. URL: <https://botta.ch/it/SPA-ZIO%20DEL%20SACRO?idx=2> (Дата обращения: 24.06.2025).
11. Landezine: Bethlehem SteelStacks Arts + Cultural Campus. [Электронный ресурс]. URL: <https://landezine.com/bethlehem-steelstacks-arts-culture-campus-by-wrt/> (Дата обращения: 24.06.2025).
12. Сайт WRT: Steel Stacks Arts and Cultural Campus. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wrt-design.com/projects/steelstacks> (Дата обращения: 24.06.2025).
13. Сайт Danielzik Leuchter + Partner: Westpark Bochum. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dl-landschaft.de/projekt/westpark-bochum-jahrhunderthalle/> (Дата обращения: 24.06.2025).
14. UNESCO: Ir.D.F. Woudagemaal (D.F. Wouda Steam Pumping Station) [Электронный ресурс]. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/867/> (Дата обращения: 24.06.2025).
15. Сайт архитектурной компании J.O.N.G. architecten: проект machine. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jongarchitecten.nl/projecten/een-unieke-plek-beleven> (Дата обращения: 24.06.2025).
16. Сайт Studio Egret West: Mayfield park. [Электронный ресурс]. URL: <https://studioegretwest.com/places/mayfield-park> (Дата обращения: 24.06.2025).
17. Landezine: Parc Belval Sud. [Электронный ресурс]. URL: <https://landezine.com/parc-belval-sud-by-agence-ter/> (Дата обращения: 24.06.2025).
18. Бугров К.Д., Бурнасов А.С. Экстрактивный горнопромышленный ландшафт и развитие креативной экономики: города Урала и Западной Сибири в контексте мировых процессов // Историко-географический журнал. 2025. Т. 4. № 1. С. 122–141. DOI: 10.58529/2782-6511-2025-4-1-122-141.
19. Merwin L., Umek L., Anastasio A. Urban post-industrial landscapes have unrealized ecological potential [Электронный ресурс] // Restoration Ecology. 2022. DOI: 10.1111/rec.13643. URL: https://www.researchgate.net/publication/358433567_Urban_post-industrial_landscapes_have_unrealized_ecological_potential (Дата обращения: 30.06.2025).
20. Harfst J., Sandriester J., Mildeberg S., Dołzbłasz S., Grochowska A. Policies on industrial heritage tourism as a tool for sustainable regional development? a Central and Eastern European analysis [Электронный ресурс] // Tourism Recreation Research. 2025. DOI: 10.1080/02508281.2025.2464499. URL: <https://www.tandfonline.com/journals/rtrr20?src=pdf> (Дата обращения: 29.06.2025).

Информация об авторах

Ткаченко Семён Георгиевич, аспирант кафедры архитектурного и градостроительного наследия. E-mail: archtkachenko@yandex.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 26.08.2025 г.

© Ткаченко С.Г., 2026

Tkachenko S.G.*

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

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

MODERN PRACTICE OF REVITALIZATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL LANDSCAPES

Abstract. *In the post-industrial era, abandoned industrial areas have become problematic and depressed areas in many cities, as well as strategically important points for the potential development of urban infrastructure. In this article, the author examines the experience of revitalizing industrial landscapes into modern*

public spaces, urban parks, and museum territories. The article highlights the need to transform former industrial areas to improve the quality of life for citizens and develop urban infrastructure. It also explores the concept of "industrial landscape" in architectural and landscape practices. The article analyzes six completed projects and identifies the main principles of revitalization of industrial landscapes: preservation of valuable architectural and landscape objects, creation of a unique symbolic image of the area based on the emphasis of visual and semantic dominants, development of a functional and transport-pedestrian scheme for the transformed area, taking into account various scenarios of use, improvement of the environmental conditions of the area, and justification of the economic feasibility of the transformations through the maximum possible use of the preserved historical environment. The practice of transforming and sustainably developing industrial landscapes provides a basis for developing and using new approaches and methods for working with historical industrial areas to address identification, urban planning, architectural and planning, environmental, and economic challenges.

Keywords: industrial heritage, industrial landscape, landscape architecture, revitalization, sustainable development, site improvement

REFERENCES

1. Golovanova E.V. The predictive potential of D. Bell's theory of post-industrialism [Prognosticheskiy potencial teorii postindustrialisma D. Bella]. Bulletin of Slavic Cultures. 2013. No. 4(30). Pp. 11–17. (rus)
2. Tsepilova O.P. Analysis of the experience of re-adaptation of industrial architecture [Analiz opyta povtornoj adaptacii promyshlennoj arhitektury]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 12. Pp. 74–90. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-12-74-90.
3. Alekseeva E.V. Modern Conversion of Historically Formed Industrial Landscapes in Coal-Producing Regions: Problems and Solutions [Sovremennaya konversiya istoricheski sformirovavshikhsiya industrialnih landshaftov v ugledobivaushih regionah: problem i resheniya]. Bulletin of Donetsk National University. Series B: Humanities. 2021. No. 3. Pp. 7–12. (rus)
4. Tkachenko S.G., Granstrem M.A., Lavrov L.P., Stieglitz M.S. The specifics of the formation of the natural and artificial landscape of the historical industrial enterprises of the Kama region [Specifika formirovaniya landshafta istoricheskikh promyshlennykh predpriyatij Prikam'ya]. Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2025. No. 1–2. pp. 68–73. DOI: 10.31659/0044-4472-2025-1-2-68-73. (rus)
5. Alekseeva E.V. Industrial Heritage of Factory Towns: Foreign Approaches to Study, Preservation, and Use [Industrialnoye naslediye gorodov-zavodov: zarubezhnye podvodi k izucheniu, sohraneniu i ispolzovaniyu]. Actual Problems of Studying Historical Factory Towns: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Izhevsk, September 22–23, 2020. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. Pp. 12–19. (rus)
6. Stuart I. Identifying industrial landscapes. TICCIIH guide to industrial heritage conservation. Industrial heritage re-tooled. Edited by J. Douet. Lancaster: Carnegie Publishing, 2012. Pp. 48–54.
7. Tyutyunnik Yu.G. Landscapes of Industrial Territories: Place in Culture, Subject of Research, and Terminology and Meaning Issues [Landshafti industrialnih territorii: mesto v culture, predmet issledovaniya, problem terminologii i smysla]. Geographical Bulletin. 2020. No. 1(52). Pp. 42–59. (rus)
8. Website Latz + Partner. URL: <https://www.latzundpartner.de> (Request date: 24.06.2025)
9. Landezine: Parco Dora. URL: https://landezine.com/parco-dora-latz-partner-landscape_architecture/ (Request date: 24.06.2025).
10. Website Mario Botta Architectti. URL: <https://botta.ch/it/SPA-ZIO%20DEL%20SACRO?idx=2> (Request date: 24.06.2025).
11. Landezine: Bethlehem SteelStacks Arts + Cultural Campus. URL: <https://landezine.com/bethlehem-steelstacks-arts-culture-campus-by-wrt/> (Request date: 24.06.2025).
12. Website WRT: Steel Stacks Arts and Cultural Campus. URL: <https://www.wrtdesign.com/projects/steelstacks> (Request date: 24.06.2025).
13. Website Danielzik Leuchter + Partner: Westpark Bochum. URL: <https://www.dl-landschaft.de/projekt/westpark-bochum-jahrhunderthalle/> (Request date: 24.06.2025).
14. Website UNESCO: Ir.D.F. Woudagemaal (D.F. Wouda Steam Pumping Station). URL: <https://whc.unesco.org/en/list/867/> (Request date: 24.06.2025).
15. Website J.O.N.G. architecten: machine. URL: <https://www.jongarchitecten.nl/projecten/een-unieke-plek-beleven> (Request date: 24.06.2025).
16. Website Studio Egret West: Mayfield park. URL: <https://studioegretwest.com/places/mayfield-park> (Request date: 24.06.2025).

17.Landezine: Parc Belval Sud. URL: <https://landezine.com/parc-belval-sud-by-agence-ter/> (Request date: 24.06.2025).

18.Bugrov K.D., Burnasov A.S. Extractive Mining Landscape and Development of Creative Economy: The Cities of Urals and Western Siberia in the Context of Global Processes [Ekstraktivnyj gornopromyshlennyj landschaft i razvitie kreativnoj ekonomiki: goroda Urala i Zapadnoj Sibiri v kontekste mirovyh processov]. Istoriko-geograficheskiy zhurnal [Historical Geography Journal]. 2025. vol. 4. No. 1. Pp. 122–141. DOI: 10.58529/2782-6511-2025-4-1-122-141. (rus)

19.Merwin L., Umek L., Anastasio A. Urban post-industrial landscapes have unrealized ecological potential. Restoration Ecology. 2022. DOI: 10.1111/rec.13643. URL: https://www.researchgate.net/publication/358433567_Urban_post-industrial_landscapes_have_unrealized_ecological_potential (Request date: 30.06.2025).

20.Harfst J., Sandriester J., Mildeberg S., Dołzbłasz S., Grochowska A. Policies on industrial heritage tourism as a tool for sustainable regional development? a Central and Eastern European analysis. Tourism Recreation Research. 2025. DOI: 10.1080/02508281.2025.2464499. URL: <https://www.tandfonline.com/journals/rtrr20?src=pdf> (Request date: 29.06.2025).

Information about the authors

Tkachenko, Semen G. Postgraduate student of the Department of Architectural and Urban Heritage. E-mail: archtkachenko@yandex.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya Street, 4.

Received 26.08.2025

Для цитирования:

Ткаченко С.Г. Современная практика ревитализации и устойчивого развития индустриальных ландшафтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-75-85

For citation:

Tkachenko S.G. Modern practice of revitalization and sustainable development of industrial landscapes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 75–85. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-75-85

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-86-99

Адонина А.В.

Самарский государственный технический университет

E-mail: adoninanna@gmail.com

МЕЖДУ РЕАЛЬНОСТЬЮ И УТОПИЕЙ: СПЕКУЛЯТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАК МЕТОД АРХИТЕКТУРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Аннотация. Статья анализирует спекулятивное проектирование как метод концептуального моделирования будущего на стыке архитектуры, дизайна и медиаискусства. В отличие от прогнозных подходов, спекулятивное проектирование оперирует воображаемыми и гипотетическими мирами, выступая инструментом критической рефлексии и культурного экспериментирования. Цель исследования – выявить исторические и методологические основания спекулятивного дизайна и определить его потенциал в качестве инструмента социокультурного прогнозирования.

Методология опирается на междисциплинарный анализ и включает историко-сравнительное рассмотрение традиции утопического мышления, исследование ключевых манифестов концептуального искусства и критического дизайна, а также интерпретацию проектов на стыке архитектуры, искусства и цифровых технологий в контексте современных медиальных практик. Систематизация примеров – от утопий Т. Мора и радикальных архитектурных групп XX века до российской «бумажной архитектуры» и современных исследовательских программ – позволяет показать внутреннюю эволюцию спекулятивного подхода.

Основные результаты демонстрируют его двойственный характер: с одной стороны, спекулятивное проектирование открывает новые горизонты воображаемого проектирования и формирует альтернативные сценарии будущего; с другой – сталкивается с ограничениями в области масштабируемости, финансирования и институциональной поддержки, а также риском эстетизации и утраты критической функции.

В заключение подчеркивается, что, несмотря на выявленные трудности, спекулятивное проектирование сохраняет актуальность в условиях глобальных вызовов, предоставляя архитекторам, исследователям и образовательным учреждениям инновационный инструмент работы с будущим и разработки критических сценариев культурного и технологического развития.

Ключевые слова: спекулятивное проектирование, архитектура будущего, утопия, футурология, критический дизайн, медиаискусство, цифровые утопии

Введение. Архитектура и дизайн сегодня все чаще понимаются как инструменты моделирования будущего. Усиление глобальных кризисов – экологических, технологических, социальных – требует поиска не только прагматических решений. Все более важным становится формирование альтернативных сценариев развития. Современные формы проектирования выходят за рамки формально-технических задач и становятся не только практикой, но и способом критического мышления и рефлексии о социокультурных трансформациях, которые формируют архитектурно-пространственные образы возможного будущего.

В этих условиях особое значение приобретает спекулятивное проектирование, ориентированное не просто на прогнозирование вероятностей, а на исследование воображаемых миров и гипотетических ситуаций. Концепт утопии в этом контексте перестает рассматриваться как недостижимый идеал и обретает значение теоретического инструмента, позволяющего исследовать границы возможного. Следуя традиции Э. Блоха и Ф. Джеймсона, утопическое выступает не как противопоставление реальности, а как

способ раскрытия ее альтернативных потенциалов. Именно в этом напряжении между воображаемым и реальным, идеальным и прагматическим, располагается поле спекулятивного проектирования. Несмотря на всевозрастающий интерес к теме, научная систематизация принципов спекулятивного проектирования в архитектурной теории пока остается недостаточной. Особенно мало изучены методологические различия между утопическим мышлением, футурологическим прогнозированием и спекулятивным подходом – что и определяет актуальность данного исследования. Новизна исследования заключается в рассмотрении спекулятивного проектирования не как художественного метода, а как полноформатной исследовательской стратегии, способной соединить аналитические, проектные и футурологические подходы.

Цель исследования – выявить исторические и методологические основания спекулятивного проектирования и определить его потенциал как инструмента социокультурного прогнозирования. Для достижения цели решаются задачи: 1) систематизация истоков утопического мышления; 2) анализ концептуальных и радикальных

проектных практик XX века; 3) рассмотрение современных цифровых и медийных форм спекулятивного проектирования.

Историко-сравнительный анализ источников позволяет выявить ракурс постепенного перехода от утопического воображения к проектным стратегиям. В этом контексте возникает вопрос: каким образом архитектурное проектирование становится инструментом концептуализации будущего? Ответ на этот вопрос требует обращения к историческим и теоретическим предпосылкам формирования спекулятивного проектирования.

Истоки спекулятивного проектирования восходят к традиции утопического мышления – от «Утопии» Т. Мора [1] и романа У. Морриса «Вести из ниоткуда» [2], где архитектура рассматривается как форма социального воображения, – до концептуального искусства 1960-х годов.

В эссе «Paragraphs on Conceptual Art» С. Левитт показывает, что сама идея может быть равнозначна произведению искусства [3]. В отечественной гуманитарной традиции А.В. Иконников [4] рассматривает утопическое мышление как важный элемент культурного и проектного развития. Эти подходы получают развитие в авангардных архитектурных группах второй половины XX века – прежде всего в работах «Archigram», моделировавших мобильные сценарии городской жизни [5].

В XXI веке идеи спекулятивного проектирования систематизированы Э. Данном и Ф. Рэби в книге «Speculative Everything», в русском переводе «Спекулятивный мир» [6]. Авторы обосновывают проектирование как критический метод постановки вопросов о последствиях технологических и социальных нововведений. Современные интерпретации подчеркивают, что спекулятивное проектирование влияет на развитие медиаискусства, акцентируя внимание на коммуникативных аспектах дизайна [7], а также приобретает выраженное политическое измерение в контексте критического подхода к социокультурным и идеологическим структурам [8].

Актуальные разработки в области исследований будущего подтверждают эту тенденцию. Л.К. Йоханнесен, М.М. Кейч и И.Н. Петтерсен систематизируют особенности, методы и практики спекулятивного и критического дизайна, демонстрируя его потенциал как инструмента исследования альтернативных сценариев развития [9]. Х. Рамос в работе «Внутренняя игра будущего» развивает концепцию, где личное воображение и рефлексия становятся ключевыми элементами футурологической практики, превращая

прогнозирование в процесс глубинного самопознания и коллективного визионерства [10]. Таким образом, спекулятивное проектирование рассматривается в исследовании как поле пересечения архитектурной теории, футурологических практик и художественного воображения, в котором проектирование становится формой критического моделирования будущего.

Методы и принципы исследования. Методологическая база исследования строится на принципах междисциплинарности, соединяющей архитектурную теорию, историю искусства, медиаисследования и футурологию. Такой подход обусловлен двойственной природой спекулятивного проектирования: оно опирается на прогнозные методы, но одновременно использует художественные и философские практики воображения.

Объектом исследования является спекулятивное проектирование как междисциплинарная практика, формирующая представления о будущем на пересечении архитектуры, дизайна и медиаискусства.

Предметом исследования выступают методологические основания и прогнозные функции спекулятивного проектирования в социокультурном контексте.

Анализ ведется на четырех взаимосвязанных уровнях: историко-философском (интерпретация утопического мышления и его трансформаций); концептуально-теоретическом (осмысление ключевых принципов критического и спекулятивного дизайна); медийном (рассмотрение проектных практик в цифровой среде); сценарном (моделирование гипотетических миров и прогнозных сценариев будущего).

В исследовании использованы несколько направлений анализа:

Историко-сравнительный метод. Его применение позволяет проследить эволюцию утопического мышления от проекта Т. Мора и утопии У. Морриса до таких радикальных архитектурных групп XX века, как «Archigram». Такой метод выявляет траекторию развития идей от философских текстов до архитектурных гипотез.

Теоретико-концептуальный анализ. Используется при изучении программных текстов С. Левитта [3], а также ключевого труда Э. Данна и Ф. Рэби [6], которые оформили спекулятивный дизайн как самостоятельное направление в проектировании. Развернутый анализ методологических оснований спекулятивного и критического дизайна представлен в исследовании М. Малпасса [11], а также в критическом обзоре Л. Прадо и П. Оливейры [12].

Медийный анализ. Необходим для рассмотрения экспериментов на стыке архитектуры

и цифрового искусства. Здесь важным является вклад лаборатории «Experiments in Art and Technology» (Е.А.Т.) [13], движения «Sci-Art» [14] и исследовательских центров, работающих с цифровыми платформами (К. Квастек [15], Л. Манович [16], О. Горюнова [17]).

Сценарное прогнозирование. Метод «а что, если?» используется здесь не как поиск вероятностного прогноза, а как постановка альтернативных гипотез. Подобные подходы обоснованы в трудах П. Г. Крога [18], посвященных спекулятивным методикам дизайна, а также в концепции «экспериментального будущего» Х. Рамоса [19].

Применяются приемы сравнительного и нарративного анализа проектов, а также визуальные методы реконструкции и интерпретации сценариев, раскрывающие смысловые и социокультурные функции спекулятивного проектирования.

Таким образом, методология исследования сочетает исторический анализ, концептуальную критику, медиальный подход и практики сценирования будущего. Это позволяет рассматривать спекулятивное проектирование не только как художественную традицию, но и как исследовательский инструмент моделирования альтернативных миров. Комплексное применение перечисленных методов позволяет выявить структурные уровни спекулятивного проектирования и раскрыть его потенциал как метода культурного прогнозирования.

Генезис и эволюция спекулятивного проектирования.

Утопическое мышление и литературные истоки. Одними из первых форм воображаемого проектирования, тесно связанных с социальной критикой, стали утопические тексты Нового времени. В своей «Утопии» (1516) Т. Мор описал островное общество, где рациональная организация пространства была неразрывна с устройством этого общества [1]. Эта работа положила традицию трактовки архитектуры как инструмента социального воображения.

В романе У. Морриса «Вести из ниоткуда» (1890) [2] представлена гармоничная модель общества, основанная на коллективизме и ремесленном труде. В его описаниях городских кварталов, домов и интерьеров архитектурные решения напрямую выражали философию равенства. Таким образом, архитектурные формы были наделены функцией воплощения альтернативной социальной реальности.

Таким образом, литературные утопии стали первой «мысленной лабораторией» будущего, откуда спекулятивное проектирование наследует

прием продуцирования гипотетических сценариев. Важно подчеркнуть, что, в отличие от классической утопии с ее закрытой структурой идеального сообщества, современные спекулятивные практики ближе к модели «малых утопий» (Э. Блох), в которой сам акт мечтания и мысленного эксперимента становится процессом социального воображения. Такое понимание утопического позволяет рассматривать воображаемые миры не как эстетические фигуры, а как способ постижения и моделирования возможных реальностей.

Концептуальное искусство и сила идеи. В XX веке значительную роль сыграло концептуальное искусство. С. Левитт в эссе «Paragraphs on Conceptual Art» (1967) утверждал, что идея может быть произведением искусства [3]. Эта установка сместила фокус с реализации на мыслительный эксперимент.

В начале 2000-х годов архитектор Бен Николсон в книге «The World: Who Wants It?» [20] критиковал глобальную финансовую систему, предлагая проектные сценарии новых политико-экономических порядков. Его работы подчеркнули потенциал архитектуры как аналитического инструмента для исследования социальных и макроэкономических систем.

Таким образом, концептуальное искусство и критическое проектирование расширили функцию архитектуры до постановки вопросов и анализа альтернативных миров.

Радикальные архитектурные группы XX века. В шестидесятые годы XX века на волне критики модернизма возникли радикальные архитектурные движения. Британская группа Archigram [5] предложила проекты «Walking City», «Plug-In City», «Instant City», где архитектура трактовалась как гибкая, мобильная среда, зависящая от инфраструктур и коммуникаций (рис. 1). Их «архив» был обобщен в сборнике «The Archigram Archive» (1961–1974) [21].

Итальянские коллективы «Superstudio» и «Archizoom» моделировали ироничные утопии (рис. 2), выводя критику потребительской культуры в проекты бесконечных сетчатых структур или «антимodelей» города [22].

Австрийская группа «Haus-Rucker-Co» развивала практику перформативной архитектуры. Их проект «Mind Expanders» (1972, Documenta 5) представлял собой надувную оболочку, выступающую из фасада музея и создающую пространство отдыха и игры [23]. Участники становились не просто зрителями, а активными агентами, «расшатывающими» привычное восприятие среды (рис. 3).

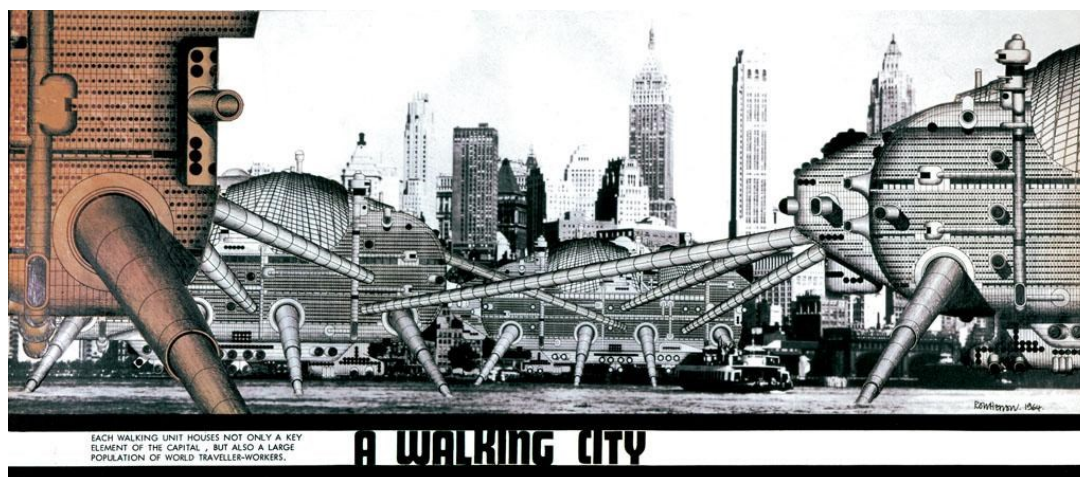


Рис. 1. Walking City in New York, 1964 г.

[<https://www.abitare.it/en/gallery/research/publications/archigram-the-book-gallery/?ref=366875>]

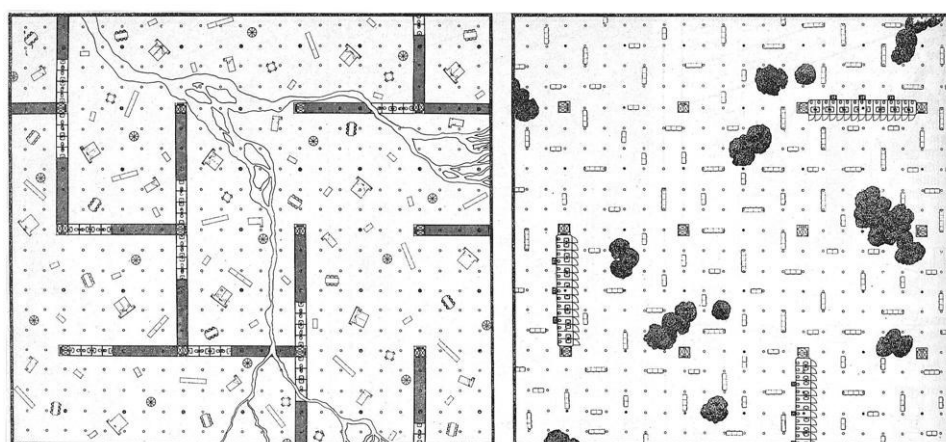


Рис. 2. No-stop City – Archizoom Associates, 1971 г.

[<https://www.abitare.it/en/gallery/research/publications/archigram-the-book-gallery/?ref=366875>]



Рис. 3. Проект Oase № 7, Кассель, 1972 г.

[<https://www.spatialagency.net/database/haus-rucker-co>]

Таким образом, радикальные группы XX века превратили архитектуру в форму художественного высказывания и «виртуальный сценарий будущего», что закладывает основу современного спекулятивного проектирования.

Российская традиция: бумажная архитектура. В условиях СССР 1980-х феномен «бумажной архитектуры» (М. Белов, А. Бродский, И. Уткин, Ю. Аввакумов и др.) [24] стал реакцией на стандартизацию массового строительства.

Проекты существовали на бумаге, чаще в виде рисунков и текстов, но выполняли роль «мысленных экспериментов».

Примером может служить проект «Городность» А. Бродского и И. Уткина (рис. 4), где архитектура представлена как воображаемая утопия. В своих поздних работах А. Бродский продолжил размывать границы между архитектурой и искусством, развивая идеи трансформации пространства.



Рис. 4. Проект «Город-мост», 1990 г.

[<https://russianculture.wordpress.com/2011/01/12/the-paper-architecture-of-brodsky-and-utkin/>]

Таким образом, бумажная архитектура показывает, что даже в условиях ограничений и невозможности реализации воображаемые проекты выполняют функцию критики и формируют альтернативное будущее.

Критическая теория XXI века. В начале XXI века спекулятивное проектирование укрепилось в теоретическом поле. М. Малпасс предложил реконструкцию истории критического проектирования и проанализировал его современные вызовы [11]. Л. Прадо и П. Оливейра [12] указали на риски редукции метода до «модной стилистики», утраты исследовательской глубины.

Б. Браттон в «The Stack» (2016) представил модель цифровой инфраструктуры как планетарной архитектуры [25], а в магистерской программе «Terraforming» (2019–2021) [26] описывал Землю как проект, что требует стратегического воображения для одновременного решения климатических, технологических и социальных проблем.

Таким образом, в XXI веке спекулятивное проектирование институционализируется как методология – от анализа цифровых систем до образовательных программ мирового уровня.

Цифровые лаборатории и медиальные среды. Важным направлением развития становится интеграция науки, искусства и технологий. Эксперименты «Experiments in Art and Technology» (E.A.T.) [13] и движение «Sci-Art» [14] показали возможности междисциплинарных коллабораций. Современные исследовательские центры, такие как «Le Laboratoire», основанный Д. Эдвардсом [27, 28], делают акцент на эксперимент как на способ создания альтернативных сценариев.

В парадигме цифрового искусства особенно важны работы К. Квастек об эстетике интерактивного искусства [15], Л. Мановича о «AI Aesthetics» [16] и О. Горюновой о культурных платформах [17]. Эти проекты воплощают идею «виртуальных лабораторий будущего», где моде-

лируются утопические и антиутопические сценарии, а воображаемые миры становятся частью культурного опыта миллионов пользователей.

Таким образом, в цифровую эпоху спекулятивное проектирование выходит за пределы архитектуры и утверждается как медиально-культурный метод моделирования будущего.

Спекулятивность в медиаискусстве и цифровых лабораториях.

Данный вектор исследования позволяет проанализировать новые форматы междисциплинарного взаимодействия. Помимо архитектуры и градостроительства, спекулятивное проектирование широко используется в медиаискусстве, где проекты становятся формой междисциплинарного эксперимента. Одним из первых направлений стал Sci-Art, объединявший практики науки и искусства. Каталог выставки «Mathematics in the World of Numbers and Beyond» [29] показал, что концептуальные художественные проекты способны одновременно выполнять роль образовательных моделей и воображаемых сценариев развития.

Чуть раньше эксперименты с соединением искусства и науки проводились группой Experiments in Art and Technology (E.A.T.) [13]. Здесь художники и инженеры вместе разрабатывали новые формы взаимодействия человека и среды. Эти эксперименты можно рассматривать как прямых предшественников медиальных лабораторий спекулятивного типа (рис. 5).

Трансгенное искусство и биотехнологии. В конце XX – начале XXI века значительное внимание уделялось биотехнологическим практикам. Работы Э. Каца (Telepresence and Bio Art) наглядно продемонстрировали, что спекулятивное проектирование может исследовать социальные последствия вмешательства человека в живые системы [30]. Такие проекты функционируют как мысленные эксперименты, ставят вопросы об этике, границах инженерии и возможных будущих формах взаимодействия между человеком и биологией.

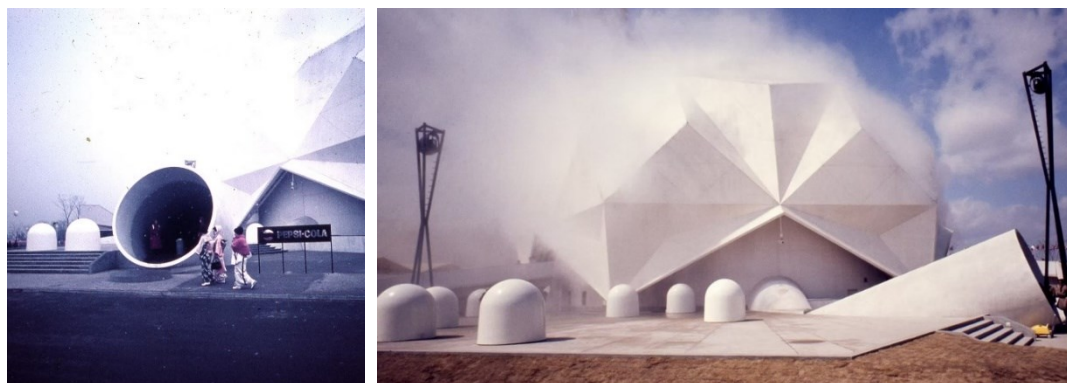


Рис. 5. Павильон Pepsi на Экспо в Осаке, 1970 г.
[<https://www.experimentsinartandtechnology.org/pepsi-pavilion>]

Виртуальные миры и цифровые лаборатории. Сегодня спекулятивное проектирование выходит за пределы объектов и напрямую работает с цифровыми и виртуальными мирами. Инсталляции, видеоигры и VR-платформы становятся «экспериментальными лабораториями», где конструируются целые утопии и антиутопии. Уже привычные цифровые практики (концепции метавселенных, сценарии цифрового кинематографа и виртуальные цифровые среды) постепенно закрепляют спекулятивное проектирование как форму массовой культурной привычки.

В российском академическом поле также появляются работы, посвященные интерпретации цифровых утопий и сценариев будущего, например, образ «города повсеместных коммуникационных потоков» [31]. Такие публикации подтверждают, что спекулятивное проектирование обретает институциональную значимость и в отечественной науке.

Отечественные лаборатории и цифровые инициативы. В последние годы в России сложилась разветвленная сеть лабораторий и фестивалей, развивающих направления цифрового и спекулятивного проектирования. Если международные лаборатории медиаискусства задали технологическую и методологическую рамку спекулятивного подхода, то в России этот вектор получил развитие в институциональных и независимых центрах цифрового проектирования. Они формируют собственные исследовательские и образовательные программы, а также создают инфраструктуру для междисциплинарных экспериментов в области архитектуры, дизайна и медиаискусства.

Опыт Москвы. Онлайн-платформа Garage Digital при Музее «Гараж» объединяет художественные резиденции и грантовые программы, направленные на работу с виртуальными и смешанными средами (VR/AR, ИИ, игровые наборы). Тематика ежегодных опен-коллов («Расположенные миры», 2021/22) задает исследовательский вектор многомирия и проектирова-

ния альтернативных реальностей, превращая музей в экспериментальную «лабораторию спекулятивных сценариев» [32].

Лаборатория Shukhov Lab (НИУ ВШЭ) развивает фаб-лаб подход и методы прототипирования городов будущего: проекты «Urban Meditation», «Urban Modularity», «СИБУР Circularity», «СИБУР Polycarbo» сочетают критическое урбанистическое моделирование и цифровое производство [33].

Постдипломные программы Strelka Institute – «The New Normal» (2017–2019) и «The Terraforming» (2020–2022) – ввели в российскую повестку понятия планетарного урбанизма и искусственной антропосферы, интегрируя методы ИИ-анализа данных, кино и спекулятивного проектирования [34].

Независимая площадка Laboratoria Art & Science (осн. 2008) связала экспериментальную науку и арт-практики: выставка «New Elements» (2021–2022) исследовала материальность данных и нечеловеческие формы со-агентности [35].

Опыт Санкт-Петербурга.

Art & Science Center Университета ИТМО (с 2018) реализует магистерскую программу и биоарт-лабораторию, готовя дизайнеров будущего, объединяющих биотехнологии, робототехнику и медиа-арт (рис. 6). Программа регулярно проводит интенсивы по спекулятивному дизайну [36].

CYLAND Media Art Lab и фестиваль CYFEST (с 2007) функционируют как мобильная продакшн-платформа, развивающая роботические и нет-арт проекты и выдвигающая российский технологический арт на международный уровень [37].

Региональный опыт. Цифровые и спекулятивные инициативы выходят за пределы столиц. В Казани международный фестиваль медиа-искусства «НУР» (с 2019) превращает весь город в интерактивную выставку. Юбилейная версия (2025) с темой «Новая уникальная реальность»

подчеркнула роль публичного пространства как площадки спекулятивного проектирования [38].



Рис. 6. Интерактивная инсталляция «Коды нитей», 2025 г.
[<https://art.itmo.ru/blog/projects/tproduct/726017913-419276188462-kodi-nitei/>]

VR-лаборатория Южно-Уральского государственного университета (Челябинск) создает документальные VR-проекты о городской идентичности, используя иммерсивные технологии как инструмент критического повествования. Уральская индустриальная биеннале (Екатеринбург) системно включает цифровые и AI-работы, демонстрируя, что спекулятивное искусство способно критиковать технократические модели будущего [39].

Особое значение приобретают региональные фестивали и университетские центры: Intervals Festival в Нижнем Новгороде (с 2017) превращает городскую среду в масштабный медиальный полигон [40]. В Самаре фестиваль ArtProm [41] и VR-лаборатория Самарского Политеха соединяют индустриальные технологии и иммерсивное проектирование в единое экспериментальное поле. Во Владивостоке NTI Center for Neurotechnology & VR/AR (ДВФУ) и магистратура «Digital Art» развивают дальневосточный хаб VR/AR-дизайна. В Перми фестиваль света «Просвет» (2025) исследует медиа-искусство как инструмент экологического осмысления города [42].

Современный российский ландшафт цифрового и спекулятивного проектирования таким образом охватывает институциональные фаб- и медиа-лаборатории (Shukhov Lab, ITMO Art & Science), музейные и независимые платформы (Garage Digital, Laboratoria, CYLAND) и региональные фестивали и VR-центры. Эти инициативы не только расширяют географию спекулятивных практик, но и формируют их собственную методологию – от планетарного урбанизма до биотехнологических и иммерсивных экспериментов, закрепляя спекулятивное проектирование как инструмент критики и моделирования будущего в российском контексте.

Современные глобальные практики спекулятивного проектирования.

Транснациональные корпорации и технологические утопии. В XXI веке спекулятивное проектирование активно используется не только исследовательскими лабораториями и арт-коллективами, но и транснациональными корпорациями. Такие компании, как Google, Apple, Meta и Tesla, выстраивают собственные сценарии будущего – от метавселенных и автономного транспорта до колонизации космоса [43, 44]. Спекулятивный характер этих видений заключается в том, что они формируют не только новые продукты, но и целые модели социального взаимодействия, предлагая альтернативы существующим культурным и экономическим системам.

Архитектурные бюро и радикальные проекты будущего. Современные архитектурные практики также активно используют спекулятивный подход. Архитектурное бюро BIG (Bjarke Ingels Group) представило проекты «Mars Science City» в Дубае как симуляцию инфраструктуры жизни на Марсе [45]. Проект носил скорее символический и критический характер, демонстрируя, что освоение внеземных пространств становится частью современного урбанистического воображения (рис. 7).

Наследие этих радикальных стратегий XX века прослеживается в работах современных бюро, где архитектурный объект перестает быть статичной формой и превращается в интерактивный инструмент воздействия на социальное поведение. Подобные эксперименты заложили фундамент для понимания среды как динамичной системы, открытой для проектных манипуляций и критической рефлексии.



Рис. 7. Mars Science City by BIG, 2017 г.
[https://big.dk/projects/mars-science-city-6213]

Коллектив Terreform ONE делает акцент на экологических перспективах, создавая проекты городских экосистем, включающих симбиотические отношения человека и биологических видов

[46]. Эти эксперименты иллюстрируют возможность соединения спекулятивного проектирования и биотехнологий (рис. 8).



Рис. 8. Coding plants for Venice Biennale, 2025 г.
[https://www.terreform.org/venice]

Проект АМО (исследовательское крыло бюро Рема Колхаса) «Енегора» [47] (2010) смоделировал карту Европы как систему распределения энергетических ресурсов будущего. Визуализация в духе «инфраструктурного утопизма»

подчеркивала, что проектирование может охватывать не отдельные здания, а целые макрорегионы (рис. 9).

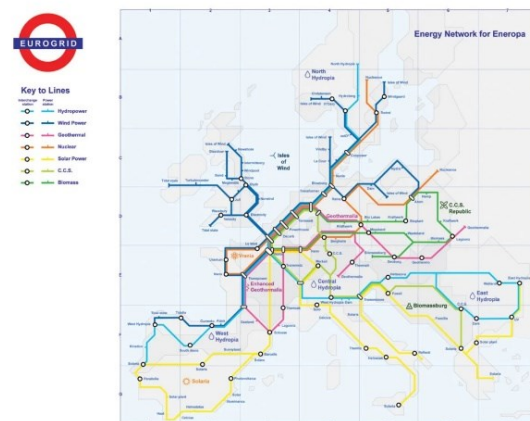


Рис. 9. Энергетическая карта Европы будущего, 2010 г.
[https://www.theguardian.com/artanddesign/gallery/2010/may/07/architecture-rem-koolhaas]

Дизайн как политическая критика. Ряд коллективов кардинально смещает спекулятивное проектирование в сторону политических и социальных экспериментов. Голландская группа Metahaven использует дизайн как инструмент критики неолиберальных порядков. В их проекте

«Facestate» [48] моделировалось воображаемое общество, в котором социальные сети стали основой новой государственной власти. Проект продемонстрировал, что дизайн способен не просто эстетизировать будущее, а выявлять механизмы политической трансформации (рис. 10).

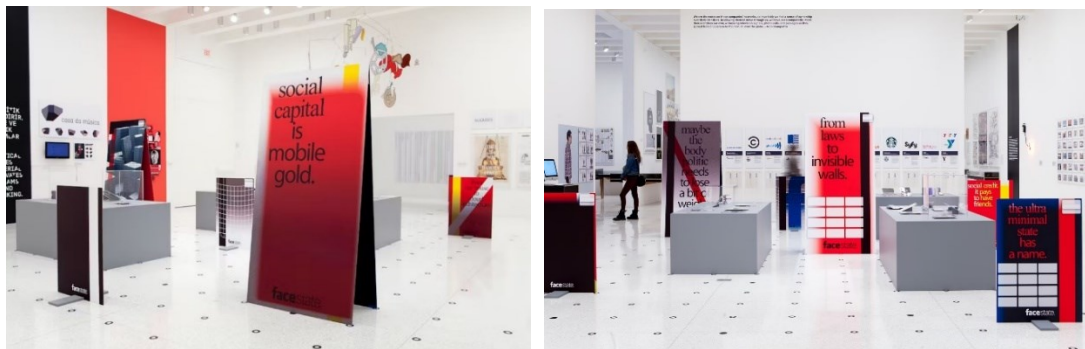


Рис. 10. Проект Facestate, 2010 г.
[<https://walkerart.org/magazine/metahavens-facestate>]

Климатические и планетарные сценарии. Особую актуальность спекулятивное проектирование приобретает в условиях климатических изменений. Программа «The Terraforming» Б. Браттона [26] в Strelka Institute позиционировала Землю как объект проектирования планетарного масштаба, объединяющий архитекторов, урбанистов, философов и экологов. Аналогичные линии развивают исследования в рамках журналов «Futures» и «Journal of Futures Studies». С. Кэнди и Дж. Дюнеган [28] описывают опытные сценарии как форму критического моделирования, а Х. Рамос [19] подчеркивает значимость «экспериментальных сценариев» для понимания коллективной среды будущего.

Переход от мегаутопий к множественным сценариям. Современные кризисы (пандемия, геополитические конфликты, экологические ограничения) способствуют трансформации спекулятивного проектирования: от грандиозных мегаутопий к множественным микро-сценариям повседневности. Л.Е. Форлано [43] пишет о «спекулятивных перспективах урбанизма», подчер-

кивая рост локальных сценариев вместо универсальных моделей. М.Л.И. Сеннергор и Л.К. Хансен [44] рассматривают спекулятивные прототипы, основанные на технологиях искусственного интеллекта. Т.Дж. Таненбаум, К. Таненбаум и Р. Ваккари [49] показывают, как воображаемые инфраструктуры могут стать формой коллективного участия и совместного проектирования.

Проблемы и ограничения спекулятивного проектирования.

Ограниченная масштабируемость. Ограниченность масштабируемости – одно из главных препятствий спекулятивного проектирования. Большинство проектов остаются уникальными объектами и не получают массового воплощения. Примером является Дом VI П. Айзенмана [50], построенный скорее, как теоретический жест, чем как реальный прототип массовой архитектуры (рис. 11). Аналогично, концепты «бумажной архитектуры» в СССР так и не вышли за пределы бумажных рисунков и выставочных альбомов.



Рис. 11. Дом VI в Корнуолле, 1975 г.
[<https://www.archdaily.com/63267/ad-classics-house-vi-peter-eisenman>]

Финансирование и институциональные барьеры. Финансирование спекулятивного проектирования также остается проблемой. Многие инициативы кажутся инвесторам «слишком утопическими» и потому не получают ресурсной поддержки. Л. Прадо и П. Оливейра [12] отмечают: методика критического дизайна антикорпоративна по своей сути, что и ограничивает его

интеграцию в рыночные стратегии. Здесь же перекликается мысль Б. Латура, что после масштабных кризисов (в его случае – пандемии) институции оказываются вынуждены перестраиваться, иначе они теряют способность обеспечивать жизнеспособность общества [51]. Так и спекулятив-

ное проектирование постоянно упирается в институциональные барьеры: оно требует новых форм поддержки, которые пока не сложились.

Опасность стилизации и потери критичности. Популярность спекулятивного проектирования в медиа и выставочной культуре нередко приводит к его стилизации, превращению в узнаваемый «визуальный стиль». Л. Прадо и П. Оливейра [12] предупреждают, что редукция метода до эстетических эффектов лишает его критической функции. Х. Рамос [19] добавляет: в массовых медиа спекулятивные проекты слишком легко становятся развлечением, теряя свой аналитический потенциал.

Культурные различия восприятия. Восприятие спекулятивного проектирования зависит от культурного контекста. В Европе и США оно активно интегрируется в университеты и корпоративные исследования, в России же чаще сохраняет статус академических или выставочных экспериментов [52, 53]. Также исследователи отмечают, что этот «разрыв» в институционализации метода влияет на его статус: где-то он становится инструментом прогнозирования, а где-то остается маргинальной практикой [18].

Заключение. Анализ показал, что спекулятивное проектирование возникло на стыке утопической традиции, концептуального искусства и радикальных архитектурных практик XX века. От идей Т. Мора и У. Морриса до проектов Archigram, Superstudio и Haus-Rucker-Co, от бумажной архитектуры до исследовательских инициатив Б. Браттона; — эволюция метода подтверждает, что спекулятивное проектирование является не только художественной стратегией, но и инструментом критического воображения и анализа.

Современные транснациональные практики демонстрируют широту применения: от проектов корпораций Google, Apple, Tesla до архитектурных и исследовательских бюро уровня BIG, Terreform ONE и АМО. Важным измерением становится политическая критика, а также климатические и планетарные сценарии. Российские исследования показывают, что в национальном контексте спекулятивное проектирование также превращается в исследовательский метод, пусть и сохраняет выставочный характер.

Вместе с тем выявлены ограничения: проекты трудно масштабировать, они сталкиваются с нехваткой финансирования, с угрозой стилизации, а также со значительными культурными различиями в восприятии.

Значительную роль в развитии метода играет медиаискусство. От первых экспериментов Sci-Art и Е.А.Т. до трансгенного и биотехнологического искусства, спекулятивное проектирование выработало особый язык моделирования, в

полной мере реализовавшийся в цифровых и виртуальных средах.

Главный итог состоит в том, что спекулятивное проектирование стало междисциплинарным исследовательским методом, способным объединять архитектуру, искусство, медиа и футурологию. Оно формирует воображаемые сценарии, которые позволяют критически анализировать последствия технологий и искать новые культурные ориентиры. Тем самым спекулятивное проектирование развивает парадигму постутопического мышления, где воображаемое и реальное взаимно проникают, а утопия превращается в практику мысленного эксперимента о возможном будущем. Как справедливо отмечает Д. Харауэй [54], в «постчеловеческую» эпоху основная задача науки и проектирования заключается в формировании «ответственного воображения», способного создавать возможные будущие миры через практики совместного мышления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мор Т. Утопия / пер. с лат. Н. П. Гилярова-Платонова. М.: Академический проект, 2001. 320 с.
2. Моррис У. Вести из ниоткуда / пер. с англ. Ю. Кагарлицкого. М.: Республика, 2004. 416 с.
3. LeWitt S. Paragraphs on Conceptual Art // Artforum. 1967. Vol. 5. No. 10. Pp. 79–83.
4. Иконников А.В. Утопическое мышление и архитектура. М.: Архитектура-С, 2004. 400 с.
5. Sadler S. Archigram: Architecture without Architecture. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. 256 p.
6. Данн Э., Рэби Ф. Спекулятивный мир: дизайн, воображение и социальное визионерство. М.: Strelka Press, 2017. 264 с.
7. Antonelli P. Talk to me: design and the communication between people and objects. New York: The Museum of Modern Art, 2011. 176 p.
8. von Borries F., Nollert A., Riemann-Tyroller X., Ahlert M., Bohaumilitzky F., Buhr E., Finkelstein C., Fischer J.-U., Hiller C., Kasten B., Levy A., Recklies M., Renfordt W. Politics of design of politics: Friedrich von Borries. Zurich: Museum für Gestaltung, 2019. 160 p.
9. Johannessen L.K., Keitsch M.M., Pettersen I.N. Speculative and critical design—features, methods, and practices // Proceedings of the design society: international conference on engineering design. Cambridge University Press, 2019. Vol. 1. No. 1. Pp. 1623–1632.
10. Ramos J. The inner game of futures // Journal of Futures Studies. 2015. Vol. 20. No. 1. Pp. 91–100.

11. Malpass M. *Critical Design in Context: History, Theory, and Practices*. London: Bloomsbury Academic, 2017. 168 p.
12. Prado L., Oliveira P. *Futuristic Gizmos, Conservative Ideals: On (Speculative) Anachronistic Design // Modes of Criticism*. 2015. URL: <http://modesofcriticism.org/articles/futuristic-gizmos-conservative-ideals/> (дата обращения: 30.09.2025).
13. *Experiments in Art and Technology*. URL: <https://www.experimentsinartandtechnology.org/> (дата обращения: 30.09.2025).
14. Громова В. Первый манифест «сайнс-арт»: к истории понятия // *Искусствознание*. 2022. № 4. С. 310–331.
15. Kwastek K. *Aesthetics of Interaction in Digital Art*. Cambridge, MA: MIT Press, 2018. 380 p.
16. Manovich L. *AI Aesthetics*. Moscow: Strelka Press, 2018. 66 p.
17. Goriunova O. *Art Platforms and Cultural Production on the Internet*. London: Routledge, 2012. 176 p.
18. Krogh P.G., Markussen T., Bang A.L. *Ways of drifting—Five methods of experimentation in research through design // ICoRD'15—Research into Design Across Boundaries Volume 1: Theory, Research Methodology, Aesthetics, Human Factors and Education*. New Delhi: Springer India, 2014. Pp. 39–50.
19. Ramos J. *Anticipatory Governance: Traditions and Trajectories for Strategic Design // Journal of Futures Studies*. 2014. Vol. 19. No. 1. Pp. 35–52.
20. Nicolson B. *The World: Who Wants It?* London: Black Dog Publishing, 2004. 256 p.
21. Crompton D. *Archigram: 1961–1974: A Guide*. Princeton: Architectural Press, 2012. 448 p.
22. Aureli P.V. *Manfredo Tafuri, Archizoom, Superstudio, and the critique of architectural ideology // Architecture and Capitalism*. London: Routledge, 2013. Pp. 132–147.
23. Haus-Rucker-Co. URL: <https://www.spatialagency.net/database/haus-rucker-co> (дата обращения: 03.10.2025).
24. Аввакумов Ю. *Бумажная архитектура: антология*. М.: Garage, Музей современного искусства «Гараж», 2023. 376 с.
25. Bratton B. *The Stack: On Software and Sovereignty*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 528 p.
26. Bratton B. *Terraforming*. Moscow: Strelka Press, 2020. 184 p.
27. Bardzell S., Bardzell J., Forlizzi J., Zimmerman J., Antanitis J. *Critical design and critical theory: the challenge of designing for provocation // Proceedings of the designing interactive systems conference*. 2012. Pp. 288–297.
28. Candy S., Dunagan J. *Designing an experiential scenario: The people who vanished // Futures*. 2017. Vol. 86. Pp. 136–153.
29. *Mathematica: A World of Numbers...and Beyond*. New York: IBM, 1983. 36 p.
30. Кас Е. *Telepresence and Bio Art: Networking Humans, Rabbits, and Robots*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2005. 278 p.
31. Адонина А.В., Кандалова А.Д. *Утопия города повсеместных коммуникационных потоков // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре*. Самара: СамГТУ, 2023. С. 611–618.
32. Garage Digital. URL: <https://garage.digital/ru/> (дата обращения: 05.10.2025).
33. Шухов Лаб. URL: <https://shukhovlab.hse.ru/> (дата обращения: 05.10.2025).
34. Браттон Б. *Интервью // ZEH Media*. URL: <https://zeh.media/praktika/intervyu/8042359-bratton> (дата обращения: 05.10.2025).
35. *New Elements // Laboratoria Art & Science Space*. URL: <https://laboratoria.art/new-elements/> (дата обращения: 05.10.2025).
36. *Art & Science // ITMO University*. URL: <https://art.itmo.ru/> (дата обращения: 05.10.2025).
37. CYLAND Media Art Lab. URL: <https://www.cyfest.art/what-is-cyland?lang=ru> (дата обращения: 05.10.2025).
38. NUR Festival. URL: <https://nurfestival.com/> (дата обращения: 05.10.2025).
39. Аникиенко Е. Южноуральцы смогут получать новости с «эффектом присутствия» // *Южноуральская панорама Онлайн*. 2021. 2 сент. URL: <https://up74.ru/articles/news/133573/> (дата обращения: 05.10.2025).
40. Шульгин Е. *Intervals 2025. Как прошел крупнейший в России фестиваль медиаарта? // Лента.ру*. 2025. 3 июня. URL: <https://lenta.ru/articles/2025/06/03/intervals-2025/> (дата обращения: 05.10.2025).
41. Прохоров И.В. *Самаре пройдет фестиваль креативных технологий «АртПром» 21–23 мая 2025 года // МК в Самаре*. 2025. 14 мая. URL: <https://samara.mk.ru/social/2025/05/14/v-samare-proydet-festival-kreativnykh-tekhnologiy-artprom-2123-maya-2025-goda.html> (дата обращения: 05.10.2025).
42. Фестиваль «Просвет». URL: <https://prosvet-fest.ru/> (дата обращения: 05.10.2025).
43. Forlano L.E., Halpern M.K. *Speculative histories, just futures: From counterfactual artifacts to counterfactual actions // ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 2023. Vol. 30. No. 2. Pp. 1–37.
44. Søndergaard M.L.J., Hansen L.K. *Intimate futures: Staying with the trouble of digital personal assistants through design fiction // Proceedings of the 2018 designing interactive systems conference*. 2018. Pp. 869–880.

45.BIG (Bjarke Ingels Group). Mars Science City Project. Dubai, 2017. URL: <https://big.dk> (дата обращения: 04.10.2025).

46.Terreform ONE. Portfolio of Projects. New York: Terreform, 2019. URL: <https://www.terreform.org> (дата обращения: 04.10.2025).

47.Architecture: Rem Koolhaas // The Guardian. 2010. 7 May. URL: <https://www.theguardian.com/artanddesign/gallery/2010/may/07/architecture-rem-koolhaas> (дата обращения: 04.10.2025).

48.Metahaven. Facestate. Exhibition / Walker Art Center. Minneapolis, 2012. 48 p.

49.Tanenbaum T.J., Tanenbaum K., Wakkary R. Design fictions // Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction. 2012. Pp. 347–350.

50.Luce K. The Collision of Process and Form: Drawing's Imprint on Peter Eisenman's House VI //

Getty Research Journal. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 125–137.

51.Latour B. After lockdown: A metamorphosis. Cambridge: Polity, 2021. 180 p.

52.Кандалова А.Д., Жданова И.В., Журавлева Я.В. Архитектурные и художественные приемы формирования инновационного театрального пространства с применением цифровых технологий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 51–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-51-61.

53.Адолина А.В. Архитектурная утопиология в русле отечественной футурологии и прогнозистики // Утопические проекты в истории культуры: материалы IV Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2023. С. 81–86.

54.Haraway D.J. Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene. Durham: Duke University Press, 2016. 312 p.

Информация об авторах

Адолина Анна Владимировна, кандидат архитектуры, доцент кафедры градостроительства. E-mail: adoninanna@gmail.com. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Поступила 22.09.2025 г.

© Адолина А.В., 2026

Adonina A.V.

Samara State Technical University

E-mail: adoninanna@gmail.com

BETWEEN REALITY AND UTOPIA: SPECULATIVE DESIGN AS A METHOD OF ARCHITECTURAL FORECASTING

Abstract. *This article analyzes speculative design as a method for conceptually modeling the future, emerging at the intersection of architecture, design, and media art. Unlike approaches focused on predicting probable scenarios, this method engages with imaginary and hypothetical worlds, serving as a tool for critical reflection and cultural experimentation. The goal of the study is to identify the historical and methodological foundations of speculative design and determine its potential as a tool for sociocultural forecasting.*

The methodology relies on interdisciplinary analysis and includes a historical and comparative examination of the tradition of utopian thinking, a study of key manifestos of conceptual art and critical design, and the interpretation of projects at the intersection of architecture, art, and digital technologies. A systematization of examples – from the utopias of Thomas More and radical architectural groups of the 20th century to Russian "paper architecture" and contemporary research programs – allows us to demonstrate the internal evolution of the speculative approach. The key findings demonstrate its dual nature: on the one hand, speculative design opens up new horizons for imaginative design and generates alternative future scenarios; on the other, it faces limitations in scalability, funding, and institutional support, as well as the risk of aestheticization and the loss of its critical function.

The conclusion emphasizes that despite the identified difficulties, speculative design remains relevant in the face of global challenges, providing architects, researchers, and educational institutions with an innovative tool for engaging with the future and developing critical scenarios for cultural and technological development.

Keywords: *speculative design, architecture of the future, utopia, futurology, critical design, media art, digital utopias*

REFERENCES

1. More T. Utopia [Utopiya]. Transl. from Latin by N. P. Gilyarov-Platonov. Moscow: Academic Project, 2001. 320 p. (rus)
2. Morris W. News from Nowhere [Vesti iz niotkuda]. transl. from English by Yu. Kagarlitsky. Moscow: Respublika, 2004. 416 p. (rus)
3. LeWitt S. Paragraphs on Conceptual Art. Artforum. 1967. Vol. 5. No. 10. Pp. 79–83.
4. Ikonnikov A.V. Utopian thinking and architecture [Utopicheskoe myshlenie i arkhitektura]. Moscow: Arkhitektura-S, 2004. 400 p. (rus)
5. Sadler S. Archigram: Architecture without Architecture. Cambridge, MA: MIT Press, 2005. 256 p.
6. Dunne A., Raby F. Speculative World: Design, Imagination and Social Visioning [Spekulyativnyy mir: dizayn, voobrazhenie i sotsial'noe vizionerstvo]. Moscow: Strelka Press, 2017. 264 p. (rus)
7. Antonelli P. Talk to me: design and the communication between people and objects. New York: The Museum of Modern Art, 2011. 176 p.
8. von Borries F., Nollert A., Riemann-Tyroller X., Ahlert M., Bohaumilitzky F., Buhr E., Finkelstein C., Fischer J.-U., Hiller C., Kasten B., Levy A., Recklies M., Renfordt W. Politics of design of politics: Friedrich von Borries. Zurich: Museum für Gestaltung, 2019. 160 p.
9. Johannessen L.K., Keitsch M.M., Pettersen I.N. Speculative and critical design—features, methods, and practices. Proceedings of the design society: international conference on engineering design. Cambridge University Press, 2019. Vol. 1. No. 1. Pp. 1623–1632.
10. Ramos J. The inner game of futures. Journal of Futures Studies. 2015. Vol. 20. No. 1. Pp. 91–100.
11. Malpass M. Critical Design in Context: History, Theory, and Practices. London: Bloomsbury Academic, 2017. 168 p.
12. Prado L., Oliveira P. Futuristic Gizmos, Conservative Ideals: On (Speculative) Anachronistic Design. Modes of Criticism. 2015. URL: <http://modesofcriticism.org/articles/futuristic-gizmos-conservative-ideals/> (accessed: 30.09.2025).
13. Experiments in Art and Technology. URL: <https://www.experimentsinartandtechnology.org/> (accessed: 30.09.2025).
14. Gromova V. The first manifesto of «science art»: on the history of the concept [Pervyy manifest «sayns-art»: k istorii ponyatiya]. Art Studies. 2022. No. 4. Pp. 310–331. (rus)
15. Kwastek K. Aesthetics of Interaction in Digital Art. Cambridge, MA: MIT Press, 2018. 380 p.
16. Manovich L. AI Aesthetics. Moscow: Strelka Press, 2018. 66 p.
17. Goriunova O. Art Platforms and Cultural Production on the Internet. London: Routledge, 2012. 176 p.
18. Krogh P.G., Markussen T., Bang A.L. Ways of drifting—Five methods of experimentation in research through design. ICoRD'15—Research into Design Across Boundaries Volume 1: Theory, Research Methodology, Aesthetics, Human Factors and Education. New Delhi: Springer India, 2014. Pp. 39–50.
19. Ramos J. Anticipatory Governance: Traditions and Trajectories for Strategic Design. Journal of Futures Studies. 2014. Vol. 19. No. 1. Pp. 35–52.
20. Nicolson B. The World: Who Wants It? London: Black Dog Publishing, 2004. 256 p.
21. Crompton D. Archigram: 1961–1974: A Guide. Princeton: Architectural Press, 2012. 448 p.
22. Aureli P.V. Manfredo Tafuri, Archizoom, Superstudio, and the critique of architectural ideology. Architecture and Capitalism. London: Routledge, 2013. Pp. 132–147.
23. Haus-Rucker-Co. URL: <https://www.spatialagency.net/database/haus-rucker-co> (accessed: 03.10.2025).
24. Avvakumov Yu. Paper Architecture: Anthology [Bumazhnaya arkhitektura: antologiya]. Moscow: Garage, Museum of Contemporary Art «Garage», 2023. 376 p. (rus)
25. Bratton B. The Stack: On Software and Sovereignty. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. 528 p.
26. Bratton B. Terraforming. Moscow: Strelka Press, 2020. 184 p.
27. Bardzell S., Bardzell J., Forlizzi J., Zimmerman J., Antanitis J. Critical design and critical theory: the challenge of designing for provocation. Proceedings of the designing interactive systems conference. 2012. Pp. 288–297.
28. Candy S., Dunagan J. Designing an experiential scenario: The people who vanished. Futures. 2017. Vol. 86. Pp. 136–153.
29. Mathematica: A World of Numbers...and Beyond. New York: IBM, 1983. 36 p.
30. Kac E. Telepresence and Bio Art: Networking Humans, Rabbits, and Robots. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2005. 278 p.
31. Adonina A.V., Kandalova A.D. Utopia of the city of ubiquitous communication flows [Utopiya goroda povsemestnykh kommunikatsionnykh potokov]. Traditions and innovations in construction and architecture. Samara: SamGTU, 2023. Pp. 611–618. (rus)
32. Garage Digital. URL: <https://garage.digital/ru/> (accessed: 05.10.2025).
33. Shukhov Lab [Shukhov Lab]. URL: <https://shukhovlab.hse.ru/> (accessed: 05.10.2025). (rus)
34. Bratton B. Interview [Interv'yu]. ZEH Media. URL: <https://zeh.media/praktika/intervyu/8042359-bratton> (accessed: 05.10.2025). (rus)

35. New Elements. Laboratoria Art & Science Space. URL: <https://laboratoria.art/new-elements/> (accessed: 05.10.2025).
36. Art & Science. ITMO University. URL: <https://art.itmo.ru/> (accessed: 05.10.2025).
37. CYLAND Media Art Lab. URL: <https://www.cyfest.art/what-is-cyland?lang=ru> (accessed: 05.10.2025).
38. NUR Festival. URL: <https://nurfestival.com/> (accessed: 05.10.2025).
39. Anikienko E. South Ural residents will be able to receive news with the «presence effect» [Yuzhnoural'tsy smogut poluchat' novosti s «effektom prisutstviya»]. South Ural Panorama Online. 2021. 2 Sept. URL: <https://up74.ru/articles/news/133573/> (accessed: 05.10.2025). (rus)
40. Shulgin E. Intervals 2025. How was the largest media art festival in Russia? [Intervals 2025. Kak proshel krupneyshiy v Rossii festival' mediaarta?]. Lenta.ru. 2025. 3 June. URL: <https://lenta.ru/articles/2025/06/03/intervals-2025/> (accessed: 05.10.2025). (rus)
41. Prokhorov I. The festival of creative technologies «ArtProm» will be held in Samara on May 21-23, 2025 [V Samare proydet festival' kreativnykh tekhnologiy «ArtProm» 21-23 maya 2025 goda]. MK in Samara. 2025. 14 May. URL: <https://samara.mk.ru/social/2025/05/14/v-samare-proydet-festival-kreativnykh-tekhnologiy-artprom-2123-maya-2025-goda.html> (accessed: 05.10.2025). (rus)
42. Festival «Prosvet» [Festival' «Prosvet»]. URL: <https://prosvet-fest.ru/> (accessed: 05.10.2025). (rus)
43. Forlano L.E., Halpern M.K. Speculative histories, just futures: From counterfactual artifacts to counterfactual actions. ACM Transactions on Computer-Human Interaction. 2023. Vol. 30. No. 2. Pp. 1–37.
44. Søndergaard M.L.J., Hansen L.K. Intimate futures: Staying with the trouble of digital personal assistants through design fiction. Proceedings of the 2018 designing interactive systems conference. 2018. Pp. 869–880.
45. BIG (Bjarke Ingels Group). Mars Science City Project. Dubai, 2017. URL: <https://big.dk> (accessed: 04.10.2025).
46. Terreform ONE. Portfolio of Projects. New York: Terreform, 2019. URL: <https://www.terreform.org> (accessed: 04.10.2025).
47. Architecture: Rem Koolhaas. The Guardian. 2010. 7 May. URL: <https://www.theguardian.com/artanddesign/gallery/2010/may/07/architecture-rem-koolhaas> (accessed: 04.10.2025).
48. Metahaven. Facestate. Exhibition / Walker Art Center. Minneapolis, 2012. 48 p.
49. Tanenbaum T.J., Tanenbaum K., Wakkary R. Design fictions. Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction. 2012. Pp. 347–350.
50. Luce K. The Collision of Process and Form: Drawing's Imprint on Peter Eisenman's House VI. Getty Research Journal. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 125–137.
51. Latour B. After lockdown: A metamorphosis. Cambridge: Polity, 2021. 180 p.
52. Kandalova A.D., Zhdanova I.V., Zhuravleva Ya.V. Architectural and artistic techniques for the formation of innovative theatrical space using digital technologies [Arkhitekturnye i khudozhestvennye priemy formirovaniya innovatsionnogo teatral'nogo prostranstva s primeneniem tsifrovyykh tekhnologiy]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 51–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-51-61. (rus)
53. Adonina A.V. Architectural utopology in line with domestic futurology and prognostics [Arkhitekturnaya utopologiya v rusle otechestvennoy futurologii i prognostiki]. Utopian projects in the history of culture: materials of the IV All-Russian Scientific Conference. Rostov-on-Don: SFU, 2023. Pp. 81–86. (rus)
54. Haraway D.J. Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene. Durham: Duke University Press, 2016. 312 p.

Information about the authors

Adonina, Anna V. PhD. E-mail: adoninanna@gmail.com. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244.

Received 22.09.2025

Для цитирования:

Адонина А.В. Между реальностью и утопией: спекулятивное проектирование как метод архитектурного прогнозирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 86–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-16-25

For citation:

Adonina A.V. Between reality and utopia: speculative design as a method of architectural forecasting. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 86–99. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-86-99

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-100-114

Пириева Л.Ю., Тарасенко В.Н., Пириев Ю.С., Василев Д.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород***E-mail: p-leila@mail.ru*

СОВРЕМЕННЫЕ ФАСАДНЫЕ СИСТЕМЫ КАК ДОМИНАНТЫ РЕКРЕАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Аннотация. Одну из важных ролей в современной архитектуре города играет внешний вид жилых и общественных зданий. Благодаря высокой функциональности, широким возможностям и меньшей подверженности повреждениям по сравнению с другими фасадными системами, архитекторы довольно часто выбирают системы навесных вентилируемых фасадов. Такие системы обладают рядом преимуществ, включая архитектурные (разнообразие используемых материалов, возможность их комбинации, а также гибкость в архитектурных и дизайнерских решениях), технологические (скорость установки фасадных конструкций и способность выполнять монтажные работы в любое время года) и экономические (окупаемость навесных вентилируемых фасадных систем в течение 5 лет благодаря снижению затрат на отопление в зимний период и уменьшению потребления электроэнергии для кондиционирования).

Применяемые новейшие строительные материалы для облицовки несущих и ограждающих конструкций зданий придают индивидуальный внешний стиль как объектам капитального строительства, так и реконструируемым объектам. Главной отличительной чертой новейших фасадных систем является сочетание красивого экстерьера, высокой функциональности, надежности, прочности и практичности. Материалы для облицовки обладают достаточно высокими прочностными характеристиками, что позволяет применять их в различных климатических районах, а также комбинировать разные варианты материалов в рамках одной подсистемы в навесных фасадных системах.

В статье проанализирован опыт применения навесных вентилируемых фасадов с современными облицовочными материалами, благодаря которым возможно изменение внешнего облика фасада жилого или общественного здания.

Ключевые слова: навесной вентилируемый фасад, облицовочные материалы, отделка фасадов, композитные панели, подсистемы фасадов.

Введение. Одну из важных ролей в современной архитектуре городской застройки играет внешний вид зданий. Архитектура города – это его визитная карточка, которая непрерывно развивается и улучшается. В наши дни применяются современные строительные материалы с высокими прочностными характеристиками при отделке как ограждающих, так и несущих конструкций жилых и общественных зданий. Использование таких материалов придает индивидуальную архитектурную выразительность объекту капитального строительства [1]. Особенность современных фасадов – это красивый экстерьер и высокая функциональность, а отличительная черта новейших фасадных систем – внешняя привлекательность, практичность, а также надежность.

Наружные ограждающие конструкции зданий в наибольшей степени подвержены воздействию неблагоприятных факторов таких как: действие термических, ветровых и механических нагрузок, атмосферные осадки, ультрафиолетовое облучение. С каждым годом агрессивность окружающей среды растет и возникает проблема коррозии фасадных поверхностей [2]. В качестве варианта наружной ограждающей конструкции

зданий можно рассматривать использование навесных вентилируемых фасадов, использующие новейшие облицовочные материалы. Это удобный в применении, эффективный и практичный способ внешней отделки, который обеспечивает высокое качество отделки как жилых, так и общественных зданий. Подобные фасадные системы способствуют созданию привлекательного облика здания, повышают его тепло- и звукоизоляционные характеристики, а также обеспечивают защиту от негативного воздействия окружающей среды, что положительно сказывается на долговечности строения. В результате достигается эффективное энергосбережение в разнообразных условиях эксплуатации [3].

В промышленно развитых странах энергосбережение является основополагающим направлением государственной политики. В Европе здания потребляют около 40% всей энергии [4, 5]. По данным прошлых лет, в России здания используют около 40 % всей потребляемой первичной энергии [6]. Ограждающие конструкции здания являются конструктивным компонентом, который оказывает наибольшее влияние на общее потребление энергии зданием [7, 8].

Создание комфортных условий в помещениях при снижении энергопотребления является важной проблемой мирового масштаба. Ограждающие конструкции здания и инженерные системы оказывают наибольшее влияние на количество потребляемой энергии. В первую очередь, это связано со снижением теплового потока через ограждающие конструкции в летний период года и предотвращением риска конденсации и инфильтрации в зимний период года [9]. Развитие технологий вентилируемых фасадов обусловлено их потенциалом в решении указанных задач, что диктует необходимость создания специализированных конструктивных решений.

Основная часть. На данный момент навесные вентилируемые фасады признаны оптимальным решением для облицовки зданий различного назначения [10, 11]. Считается, что такой тип фасада является наиболее эффективной системой утепления здания, поскольку он устраняет нежелательные мостики холода и проблемы с конденсацией, обеспечивая отличные термогигрометрические характеристики [12]. Благодаря теплоизоляции, создаваемой воздушным зазором между внешней и внутренней поверхностью возможно достичь экономии энергии на 25–35 % [13]. Система навесных вентилируемых фасадов предусматривает установку звукоизоляционного слоя, который действует, как шумовой барьер (можно достичь снижения шума на 10–20 %) [13]. В связи с этим достаточно быстро расширяется ассортимент современных облицовочных материалов, каркасов для крепления навесных фасадов и теплоизоляционных комплексов. Основными преимуществами вентилируемых фасадов являются [14, 15]:

- надежная защита от атмосферных воздействий и неблагоприятных погодных условий;
- высокая функциональность с точки зрения строительной физики (вентиляция помещений поддерживает теплоизоляцию в сухом состоянии, обеспечивая ее эффективную работу);
- высокая энергоэффективность благодаря использованию изоляционных материалов, подходящих для вентилируемых фасадов, а также инновационных подконструкций, позволяющих достичь желаемого коэффициента теплопередачи);
- простые решения, включающие регулируемые подконструкции для монтажа на неровные и сложные поверхности стен;
- комфортный микроклимат в помещении благодаря коэффициенту диффузии пара;
- охлаждающий эффект в летнее время года (благодаря воздушному зазору, через который отводится избыточное тепло);

- теплоизоляция в зимнее время года (благодаря повышенному сопротивлению теплопередаче за счет воздушного зазора);

- экологичное решение благодаря сочетанию принципа работы, использования экологически чистых материалов и энергоэффективности;

- пожарная безопасность за счет правильно подобранных компонентов системы и классов строительных материалов;

- звукоизоляция (высокие шумопоглощающие свойства утеплителей для вентиляционных фасадов в сочетании с облицовкой позволяет повысить коэффициент шумоподавления);

- молниезащита (металлические подконструкции и облицовка могут служить естественным молниеотводом или быть подключены к отдельным системам молниеотводов).

Существуют два типа навесных отделочных материалов: светопрозрачные, изготовленные из каленого высокопрочного стекла или стеклопакетов, и непрозрачные, такие как композитные панели или штучные плитные материалы. Облицовочные панели монтируют на фасадную подсистему. На сегодняшний день можно выделить три основных типа подсистем вентилируемых фасадов. Существующие различия – это материал изготовления: могут быть из алюминия, нержавеющей и оцинкованной стали [16].

Самыми распространенными считаются подсистемы из оцинкованной стали. Такие каркасы предназначены для использования при отделке из керамогранитных плит, фиброцементных панелей, натурального камня, композитных материалов и металлических кассет [17].

Для уменьшения видимости каких-либо значительных дефектов поверхности несущих стен жилого или общественного здания рекомендуется применение подсистем из оцинкованной стали, которые включают в себя элементы, позволяющие внушительно сократить количество дефектов. Еще одним положительным эффектом использования таких каркасов является легкость установки на разнообразных поверхностях [18]. Простая технология монтажа позволяет не опираться на температурные условия и применяться в любой период времени года благодаря тому, что монтажные работы не требуют выполнения мокрых технологий. Применение каркасов из оцинкованной стали, эксплуатируемых на протяжении десятилетий, подтверждает его надежность и долговечность. Коррозионная стойкость цинкового покрытия обеспечивает защиту от воздействия окружающей среды, минимизируя необходимость в частом обслуживании и замене

элементов. Это, в свою очередь, ведет к снижению эксплуатационных расходов в долгосрочной перспективе [19].

Простота обработки и монтажа оцинкованной стали также является значительным преимуществом. Более того, оцинкованная сталь является экологически безопасным материалом. Она может быть переработана и использована повторно, что соответствует принципам устойчивого развития и уменьшает воздействие на окружающую среду. Выбор оцинкованной стали для долговечных вентилируемых систем – это экономически обоснованное и экологически ответственное решение [20].

Вентилируемые фасады с каркасом из нержавеющей стали особенно востребованы в условиях агрессивной окружающей среды, например, при высокой влажности, в прибрежных зонах или промышленных районах с повышенным уровнем загрязнения воздуха. В таких районах использование оцинкованной стали может привести к преждевременной коррозии и, как следствие, к разрушению всей фасадной системы.

Кроме того, нержавеющая сталь обладает более высокой прочностью и устойчивостью к механическим повреждениям, что позволяет создавать более надежные и безопасные конструкции. Это особенно важно для высотных зданий и строений, подверженных сильным ветровым нагрузкам. Высокая несущая способность нержавеющей стали расширяет возможности применения более тяжелых облицовочных материалов [21, 22]. Значительным преимуществом таких каркасов может быть их использование в строительстве высотных зданий, где высота может составлять 50 м и выше.

В современные дни алюминиевые подсистемы становятся наиболее востребованным вариантом фасадов. Их ключевое преимущество заключается в легкости по сравнению с металлическими аналогами, что позволяет использовать такие каркасные конструкции при возведении высотных зданий и сооружений. Благодаря этому они оказывают минимальное давление на несущие стены, что особенно важно при обновлении систем вентилируемых фасадов в старых зданиях, где ресурсы конструкций практически исчерпаны [23, 24].

Среди существенных недостатков алюминиевых подсистем стоит отметить их сравнительно низкую температуру плавления, которая в три раза хуже, чем у стали, что может негативно сказаться на пожарной безопасности. Тем не менее, достоинством таких подсистем являются их высокая устойчивость и долговечность, не уступа-

ющие другим аналогам. Они отлично выдерживают различные погодные условия, воздействие влаги, ультрафиолетового излучения и прочие агрессивные факторы [25].

Кроме этого, существуют деревянные подсистемы фасадов, но на сегодняшний момент такие подконструкции используются нечасто. Это связано с их более высокой стоимостью и необходимостью обработки антипиренами и влагоотталкивающими составами.

Среди самых востребованных материалов для отделки навесных фасадов можно выделить следующие: HPL панели (плитные изделия, созданные из прессованных древесных волокон); керлит (тонкий керамогранит больших размеров) [26]; металлокассеты; керамогранит плитный; композитные панели; а также фиброцементные панели.

В архитектуре стекло является очень ценным материалом, с появлением которого в строительстве внешний вид современных городов сильно изменился. Стекланные фасады обладают уникальным сочетанием эстетических и эксплуатационных преимуществ. Стекло придает зданию уникальный и роскошный вид, а также наделяет его престижем. Немногие строительные материалы могут отталкивать проникновение солнечного света как стекло различных типов: прозрачные и полупрозрачные. Данное свойство особенно интересно таким видам зданий как аэропорт, вокзал, различные коммерческие организации, где преимущественно большое скопление людей в один промежуток времени [27].

Современные стеклопакеты создаются с определенным числом камер, которые заполняются инертным газом или обрабатываются энергосберегающими пленками. Это обеспечивает конструкции способность удерживать тепло [28]. Также следует отметить разнообразие типов стеклопакетов, которые помогают справиться с сильной жарой в летний период. Учитывая вышесказанное, правильно спроектированный навесной вентилируемый фасад со стеклом способен отражать до 100 % осадков и влаги.

Облицовка стеклом позволяет превращать скучные конструкции в яркие, выдающиеся здания. Кроме того, благодаря инновационному развитию стекольной отрасли возможно создавать кинетическую архитектуру, тем самым полностью меняя ее внешний вид при смене дня и ночи [29].

Конструкции вентилируемых фасадов с отделкой из стекла придают зданиям изысканный вид, одновременно улучшая их энергоэффективность за счет использования непрозрачной внутренней поверхности кассет (рис. 1).



Рис. 1. Здание торгового центра от KohnPedersenFoxAssociates, облицованное стеклянными кассетами, Китай
[<http://web.p-t-group.com>]

Стекло является самым износостойким и непористым материалом с рядом положительных ассоциаций, таких как престиж, современность, богатство, открытость, яркость и чистота. Покрытие стекла защитной пленкой с армированием позволяет повысить прочность конструкции, а также сохранить первоначальный внешний вид [30]. При условии правильного и качественного установления таких стекол, фасад может прослужить десятилетия и не потерять свой изначальный вид при незначительном уходе. Прочное остекление обеспечивает постоянную защиту от сильного ветра и влаги даже в сложных прибрежных условиях.

Одним из наиболее современных материалов, предназначенных для облицовки вентилируемых фасадов, являются HPL панели. Этот новый материал открывает возможности для создания оригинальных и элегантных архитектурных форм благодаря своим уникальным свойствам. HPL панели активно используются в системах вентилируемых фасадов, где требуются долговечность, устойчивость к климатическим воздействиям и выразительный дизайн. Этот материал пользуется популярностью благодаря своей необычной текстуре, а также разнообразию фактур и широкой цветовой гамме, что позволяет увеличить архитектурную выразительность объектов. Яркие декоры, большие размеры плит способствуют созданию поразительных фасадов из HPL панелей. Их ключевые преимущества включают стойкость, экологическую безопасность, влагостойкость, легкость, антипылевые свойства, устойчивость к UV-излучению, механическим повреждениям, температурным колебаниям и кислотам, к воздействию соли, а также минимальные требования к обслуживанию [31]. Защита HPL от воздействия ультрафиолета достигается за счет высококачественных наружных

слоев и стабилизаторов, благодаря чему облицовка сохраняет цвет и фактуру в течение длительного срока эксплуатации даже в регионах с активной инсоляцией [32]. Это свойство особенно важно для южных и приморских регионов, где панельные поверхности способны сохранить стабильных цвет, проявляют устойчивость к выгоранию и не требуют частой реставрации, что снижает эксплуатационные затраты.

Кроме того, материал отличается высокой адгезией и низкой пористостью, что препятствует накоплению микроорганизмов и плесени [33]. Эти характеристики HPL панелей обеспечивают их долговечность и защиту от внешних факторов, сохраняя свойства и цвет на протяжении длительного времени. HPL панели могут использоваться как для внутренней, так и для наружной отделки зданий (рис. 2).



Рис. 2. Здание корпуса центра по уходу за пожилыми людьми, облицованное HPL панелями, Бельгия
[<http://commons.wikimedia.org>]

Большая популярность вентилируемых фасадов с облицовкой HPL-панелями обосновывается сбалансированным сочетанием эксплуатационных характеристик и стоимости жизненного цикла.

Одним из востребованных материалов в России являются фасадные металлокассеты. Эти панели предназначены для облицовки зданий и крепятся на внешней стороне фасада. Производятся металлокассеты из оцинкованной стали, алюминия или композитов, а их покрытие выполняется из полиэстера или поливинилиденфторида. Для крепления кассет из стали и алюминия необходимы прочные соединения, чаще всего выполняемые из оцинкованного алюминия. Кассеты из композитных материалов легче, что снижает нагрузку на стены и фундамент [34].

Фасадные кассеты обладают отличными защитными свойствами против влажности, ветра, снега и УФ-излучения. Процесс отделки здания с помощью таких кассет проходит гораздо быстрее, чем при использовании плитки, штукатурки или покраски. Помимо удобства монтажа, такой вид отделки обеспечивает надежную защиту стен и увеличивает срок службы несущих конструк-

ций. Основными достоинствами являются: прочность, долговечность, негорючесть и устойчивость к перепадам температур, скорость монтажа, легкость по сравнению с другими видами отделочных плит, оригинальность и современный внешний вид [35].

Несравненные характеристики металлокассет делают их привлекательными не только для облицовки общественных зданий (рис. 3), но и для жилых и производственных комплексов, а также для оформления частных жилищ.

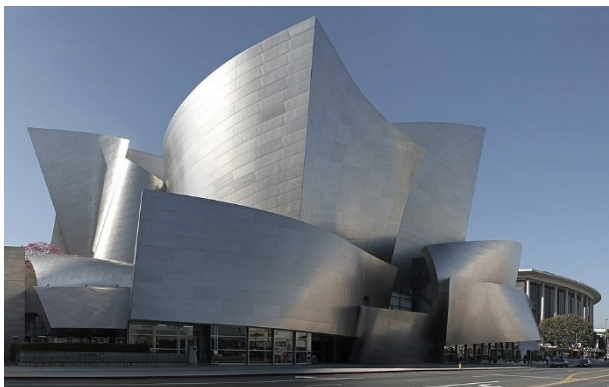


Рис. 3. Здание концертного зала имени У. Диснея, облицованное фасадными металлокассетами, США [<http://en.wikipedia.org>]

Одним из наиболее распространенных материалов в современном строительстве являются керамогранитные плиты, которые сочетают в себе эстетику натурального камня и гранита с удобством и надежностью искусственных отделочных решений. Керамогранит – это прочный и долговечный материал, который устойчив к перепадам температур, влажности, механическим повреждениям и отвечает всем требованиям безопасности, экологичности и презентабельности. Он имитирует натуральный камень, но при этом имеет более низкую стоимость и более легкий вес. Керамогранит может иметь как гладкую, так и текстурированную поверхность, а также быть однотонным или разноцветным [36].

Фасадные плитки из керамогранита по своим визуальным характеристикам напоминают натуральный гранит, но в техническом плане их превосходят. Среди основных преимуществ керамогранитных плит – высокий срок службы, составляющий до 50 лет (плиты не подвержены выцветанию под действием ультрафиолетовых лучей, она очень долго сохраняет отличные эстетические свойства и прекрасные прочностные характеристики), устойчивость к воздействию влаги и температур (благодаря крайне низкому влагопоглощению керамогранит не боится заморозков и легко переносит резкие перепады температур, не трескаясь и не деформируясь во

время цикла замерзания и оттаивания), экологическая безопасность, а также прочность (плиты устойчивы к механическим повреждениям, не царапаются, не боятся ударов и давления), стойкость к износу и деформациям [37]. Этот вид облицовки широко применяется для зданий с повышенными требованиями к пожарной безопасности (дошкольные образовательные учреждения, специализированные дома престарелых и инвалидов, спальные корпуса образовательных организаций с наличием интерната и детские организации, медицинские стационары).

Благодаря применению при производстве современных разновидностей красителей существует множество вариантов различных расцветок керамогранитных плит, а разнообразие декора и каменная прочность плит позволяют создавать эффектное и практичное покрытие для стен почти любого здания [38]. Керамогранит способен достоверно воспроизводить текстуру разных материалов – мрамора, натурального камня, бетона, дерева.

Благодаря множеству достоинств и способности придать фасаду здания эстетичный вид и привлекательность (рис. 4), керамогранит с каждым годом становится все более востребованным.



Рис. 4. Здание торгового центра «Domuscity», облицованное керамогранитными плитами, Беларусь [<http://directmap.by>]

Алюминиевые композитные панели являются одним из наиболее распространённых современных материалов для фасадной отделки. Этот многослойный композит состоит из двух слоев алюминия с полимерным покрытием и пластикового или минерального сердечника, отличается лёгкостью обработки, прочностью и долговечностью, а также придаёт зданиям современный внешний вид.

При использовании цельных металлических листов для фасадной отделки сложно достичь

ровной поверхности из-за недостаточной жёсткости стали, что может привести к эффекту «линз» (искривление) [39]. Оптимальным решением станет применение алюминиевых композитных листов нужной толщины, что позволит получить идеальную плоскость фасада (рис. 5).



Рис. 5. Здание школы начальных классов, облицованное алюминиевыми композитными панелями, Канада [http://bkl.ca]

В зависимости от толщины листа и слоя алюминия, алюминиевые композитные панели выпускаются в разных вариантах:

- панели с толщиной листа 3 мм и толщиной алюминия 0,21 мм — самый экономичный вариант для рекламных и интерьерных работ;
- панели с толщиной листа 3 мм и толщиной алюминия 0,3 мм — более надежный, но редко используется;
- панели с толщиной листа 4 мм и толщиной алюминия 0,3 мм — основной материал для фасадов, но не подходит для высотных зданий;
- панели с толщиной листа 4 мм и толщиной алюминия 0,5 мм — прочный и долговечный.

Алюминиевые панели имеют наименьший вес среди веса существующих фасадных облицовок: (приблизительно 6-7 кг на 1 м² для толщины 2 мм). Такие панели доступны как слабогорючие (Г2), так и негорючие (Г1) модификации.

Алюминиевые композитные панели имеют высокую устойчивость к ударам, давлению, изгибам и повреждениям, что значительно увеличивает их способность противостоять ветровым нагрузкам. Одним из важных качеств является негорючесть, что позволяет применять его для любых видов объектов, в том числе для зданий с повышенными требованиями к пожарной безопасности. Алюминиевые фасадные панели являются коррозионностойким материалом, устойчивым к агрессивным средам, что позволяет применять его в том числе в приморских зонах и при облицовке зданий промышленных предприятий.

Фасады из данного материала позволяют легко маскировать даже крупные неровности стен, поэтому их часто используют в строительстве и при реконструкции в навесных системах

[40]. Небольшое линейное расширение дает возможность использования панелей больших размеров, что уменьшает количество швов и создает эффект цельного фасада.

Одним из востребованных материалов для объемных архитектурных форм, крупных форматов облицовки и проектов с повышенными требованиями к несущей способности и точности геометрии плоскостей является вентилируемый фасад из сотовых алюминиевых панелей — это современное решение для облицовки, которое позволяет достичь легкости конструкции, высокой прочности, а также эстетической гибкости (рис. 6). Принципиальное преимущество таких панелей состоит в их структуре (внешние тонкие слои алюминия соединены между собой решеткой, напоминающей соты). Такое строение материала позволяет добиться высокой жесткости (уменьшает прогибы и деформации) и сохранить минимальный собственный вес, а также повысить теплоизоляцию и звукоизоляцию здания. Кроме перечисленных преимуществ, сотовые алюминиевые панели долговечны; устойчивы к любым атмосферным воздействиям; пластичны и легко формуемы; даже при больших форматах просты в хранении и легки в перемещении на стройплощадке; легко поддаются обработке; позволяют сократить сроки строительства.



Рис. 6. Здание ледового дворца спорта, облицованное алюминиевыми сотовыми панелями, Россия [https://kp.ru]

Одним из экологически чистых вариантов облицовки в навесных фасадных системах являются фиброцементные и хризотилцементные (асбестоцементные) панели, которые подходят как для наружной, так и для внутренней отделки. На сегодняшний день насчитывается свыше 400 разновидностей фиброцементных панелей. Существуют следующие виды панелей: плоские пресованные (возможно окрашенные в массу); плоские пресованные для фасадов с гладкой и рельефной поверхностью; плиты фасадные хризотилцементные (с гладкой, с рельефной поверхностью, декорированные и недекорированные); плиты окрашенные (с гладкой и рельефной поверхностью); плиты с защитно-декоративным покрытием из минеральной крошки.

Среди них можно выделить фасадные панели, имитирующие натуральный камень, дерево, рельефные скалы, кирпичную кладку, штукатурку и так далее. Эти стеновые фасадные панели различаются по качеству покрытия, защитным характеристикам, структуре и толщине самих плит. Обычно на заключительном этапе производства фиброцементных и хризотилцементных панелей на поверхность наносится керамическое покрытие, которое эффективно защищает краску от выгорания и препятствует проникновению солнечных лучей. Гидрофильный слой облегчает удаление грязи, накопившейся на панели, под воздействием осадков.

Вентилируемые фасадные панели из фиброцемента и хризотилцемента полностью соответствуют действующим санитарным стандартам и требованиям к пожарной безопасности, так как относятся к негорючим строительным материалам. Ключевыми преимуществами фиброцементных и хризотилцементных панелей являются: долговечность и устойчивость к погодным условиям (не подвержены гниению и коррозии, выдерживают резкие перепады температур и воздействие ультрафиолета); огнестойкость и безопасность (обладают повышенной негорючестью); низкие эксплуатационные расходы (устойчивы к загрязнению и просты в уходе); экологичность и устойчивость (в период эксплуатации не выделяют токсичные вещества, производство панелей с минимальным выбросом вредных веществ); широкие возможности дизайна (разнообразие цветов, фактур и размеров позволяет реализовать архитектурные идеи и создавать уникальные образы). Кроме этого, хризотилцементные панели нетоксичны (при нагревании хризотилцемент не выделяет в окружающую среду вредных веществ), устойчивы к влаге (хризотил-волокно связывается с цементом на молекулярном уровне) и отличаются точностью размеров, что способствует облегчению их монтажа. Фиброцементные фасадные панели разрешены для использования в строительстве по всей территории Российской Федерации. Доступные размеры таких панелей представлены следующими параметрами: толщина 14 мм, 16 мм и 18 мм, ширина 455 мм, длина 3030 мм. От толщины панели зависит не только глубина рельефа ее поверхности, но и способ крепления. Например, панели толщиной 14 мм могут крепиться только с помощью гвоздей или шурупов к деревянному брусу, тогда как для панелей толщиной 16 мм и 18 мм применяются специальные клеймены, которые фиксируются как на деревянном брусе, так и на металлическом профиле.

Физико-механические показатели хризотилцементных плоских листов с защитно-декоративным покрытием различаются в зависимости от вида декоративной отделки (окраска поверхности, нанесение минеральной крошки и др.) и применяемых для этих целей материалов.

Современные фиброцементные и хризотилцементные панели открывают возможности для формирования не только энергоэффективных ограждающих структур [41], но и для наделения фасадов зданий уникальным и запоминающимся стилем (рис. 7, рис. 8). Это достигается благодаря богатой цветовой палитре и сочетанию различных оттенков.



Рис. 7. Здание отеля «AktugOtel», облицованное фиброцементными панелями, Турция
[<http://vashotel.ru>]



Рис. 8. Здание школы инженерии, технологий и авиации (SNHU), облицованное хризотилцементными панелями, США
[<https://archdaily.com>]

Одним из современных энергоэффективных навесных систем являются вентилируемые фасады с облицовкой глиняной терракотой (рис. 9). Терракотовые панели обычно изготавливаются из выветренной глины, экструдированы в вакуумной камере и обжигаются в высокотемпературной роликовой печи. Как старый, но в то же время новый фасадный материал, терракотовые панели известны своей гибкостью дизайна, долговечностью и экологичностью. Такая конструкция эффективно регулирует температуру и влаж-

ность стен, продлевая срок службы здания сохраняя его привлекательный вид на долгие годы. Терракота (объемная керамика) обладает уникальной природной текстурой и высокой устойчивостью к внешним факторам. Такой фасад обеспечивает быстрый отвод влаги и надежную защиту несущих конструкций от атмосферных воздействий. В экономическом плане вентилируемые фасады с облицовкой глиняной терракотой — это способ снизить расходы на эксплуатацию. Система идеально подходит как для нового строительства, так и для реконструкции. Широкий выбор форматов и оттенков терракотовых панелей позволяет воплотить любой дизайнерский замысел и архитектурный стиль [42].

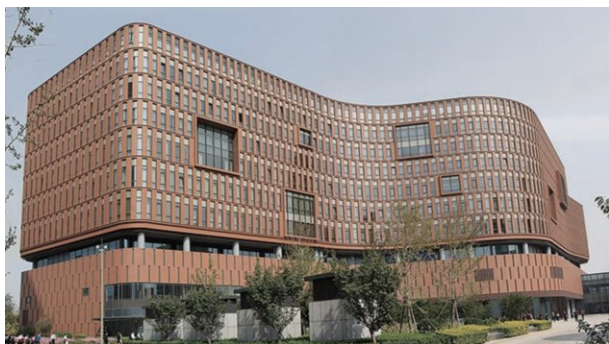


Рис. 9. Здание детского технологического учебного центра, облицованное терракотовыми фасадными панелями Китай
[<https://fi.pinterest.com>]

На сегодняшний день наиболее востребованы терракотовая сплошная плита и вентилируемые терракотовые фасадные панели. Сплошная терракотовая плита — это тонкий (10–15 мм) и легкий (приблизительно 21,5 кг/м²) облицовочный материал. Плита легко монтируется как с помощью цементного клея, так и механических система крепления. Для обеспечения максимальной прочности сцепления со сборными бетонными панелями, сплошные терракотовые элементы имеют профиль «ласточкин хвост» (тип разъемного соединения) на обратной стороне [43]. Существует плитка как с прямыми краями, так и с перекрывающимися стыками для вентилируемых фасадов. Благодаря своей легкости, плитка оказывает минимальное давление на конструкцию, что делает ее идеальным выбором как для невысоких наружных фасадов, так и для внутренних стен. Вентилируемые терракотовые фасадные панели — это двухслойные облицовочные элементы увеличенной толщины (15–100 мм), предназначенные для создания горизонтальных перекрывающихся стыков. Терракотовые панели как элементы системы навесных вентилируемых фасадов поддерживаются инженерным каркасом и крепежными элементами. Вентилируемая конструкция работает

по принципу выравнивания давления: открытые перекрывающиеся стыки и эффективная дренажная система обеспечивают одинаковое давление воздуха внутри и снаружи панелей. Это предотвращает проникновение влаги в структуру здания, защищает несущие стены и способствует энергосбережению. Существующий широкий спектр натуральных обожженных цветов, от классических до уникальных оттенков, а также эффективные варианты с цветной глазурью и множество текстур и отделок (пескоструйная обработка, полосатая, шлифованная, имитация дерева, волнистая поверхность) дает безграничные возможности для воплощения архитектурных и дизайнерских идей и решений как экстерьера, так и интерьера.

Глиняная терракота обладает высокой прочностью, возможностью переработки, экономичностью и хорошими изоляционными свойствами. Она эффективно поглощает звук и обеспечивает отличную звукоизоляцию. Срок службы глиняной плитки составляет 50–60 лет; она негорючая, морозостойкая и не требует особого ухода.

В последние годы одним из наиболее востребованных вариантов, сочетающих функциональность, долговечность и безупречный внешний вид является вентилируемый фасад с облицовкой из стеклофибробетона. Современный, надежный и легкий материал — стеклофибробетон (СФБ) открывает широкие возможности для реализации самых смелых архитектурных идей за счет своих уникальных свойств, которые делают его оптимальным решением для различных типов зданий. Гибкость СФБ в формообразовании открывает новые горизонты в архитектуре и дизайне. С его помощью можно создавать сложные криволинейные поверхности, уникальные декоративные элементы и архитектурные детали, реализация которых с использованием традиционных материалов была бы невозможна или крайне дорогостоящей (рис. 10).

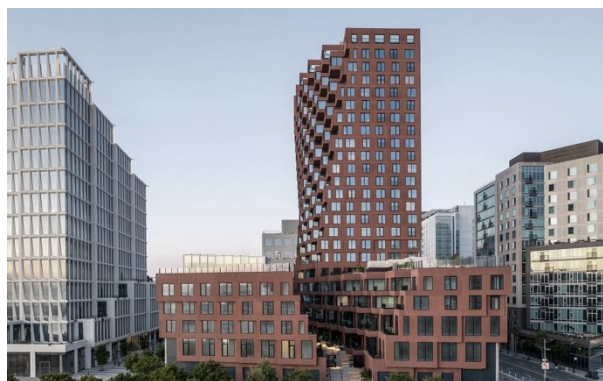


Рис. 10. Здание жилого комплекса «Каньон», облицованное стеклофибробетонными панелями, США
[<https://archdaily.com>]

СФБ-панели позволяет создавать легкие и устойчивые к внешним воздействиям фасадные конструкции благодаря сочетанию прочности бетона и гибкости, обусловленную армированием стекловолокном. Кроме этого, они обладают следующими преимуществами: долговечностью, стойкостью к агрессивным факторам внешней среды, не подвержены коррозии, устойчивы к циклам замораживания и оттаивания, ультрафиолетовому излучению и воздействию химических веществ, а также огнестойкостью. Применение СФБ позволяет снизить нагрузку на несущие конструкции здания, а высокая прочность материала позволяет создавать крупноформатные элементы облицовки, что дает возможность минимизировать количество швов и придать зданию представительный и монолитный вид [44]. Широкий выбор текстур, цветов и форм стеклофибробетонных плит открывает возможности для воплощения любых архитектурных замыслов – от имитации природного камня до создания оригинальных рельефов, подчеркивающих индивидуальность каждого проекта.

Универсальной металлической облицовкой вентилируемых фасадов зданий, которая совмещает преимущества кассет и сайдинга и обладающей рядом преимуществ являются алюминиевые и стальные линейные панели с нанесенным защитно-декоративным покрытием методом холодного профилирования. Богатый ассортимент архитектурных и технических решений с поддержкой выбора различных цветовых параметров обеспечивают неповторимость стиля. К тому же использование линейных панелей позволяет придавать фасадам выразительный и оригинальный внешний вид с четкой геометрией профиля (рис. 11). Применение таких панелей не приводит к увеличению нагрузок на фундамент и несущие конструкции и отличается меньшей трудоемкостью по сравнению с другими видами облицовки [45].



Рис. 11. Здание торгового центра Ster, облицованное линейными панелями, Польша [<https://archello.com>]

Важным качеством таких панелей является негорючесть, что позволяет применять его на всех видах фасадов зданий. По сравнению с алюминиевыми панелями, стальные склонны к коррозии в

приморских и влажных районах, что ограничивать область эксплуатации.

Заключение. С каждым годом всё большую популярность набирает облицовка жилых и общественных зданий навесной фасадной системой как с утеплителем, так и без. Современное инновационное решение обусловлено растущим желанием команды специалистов, состоящей из архитекторов и дизайнеров, разработать поистине уникальные проекты. Для достижения этой цели они предпринимают шаги по решению множества сложных задач, предлагая эффективные подходы к самым трудным архитектурным, конструктивным и дизайнерским проблемам в сфере строительства. В своем стремлении к оригинальности и креативности, профессионалы стараются улучшить каждую деталь проекта, создавая не просто здания, а произведения искусства, которые отвечают современным требованиям и ожиданиям.

Технология, лежащая в основе вентилируемых фасадных систем, раскрывает её комплексные преимущества перед традиционными и другими современными фасадными системами. Отличительной особенностью вентилируемых фасадных систем является возможность использования воздуха – возобновляемого ресурса для вентиляции. Эта особенность делает систему «вентилируемым фасадом». Постоянная вентиляция в воздушном зазоре обеспечивает сухую изоляцию стен и перекрытий, а также выводит влагу из помещения, поддерживая комфортную температуру. Вентилируемые фасадные системы придают зданию впечатляющий визуальный эффект, и после установки системы эффективность технологии повышается, повышая комфорт и благополучие находящихся в здании людей. Применение навесных вентилируемых фасадов создает возможность долгосрочно защитить наружные стены зданий, повысить уровень удобства во внутренних помещениях, а также решить проблему с энергоэффективностью объектов. Таким образом, их работа не только решает практические задачи, но и вносит вклад в развитие внутренней эстетики и функциональности пространства, что делает их проекты по-настоящему выдающимися и запоминающимися.

Однако, в России по-прежнему поставщики используют отечественную продукцию, которая в разы дешевле и доступнее, чем зарубежные аналоги. Поэтому, облицовка практически всех жилых, общественных и производственных зданий выполняется исключительно материалами местного производства. Зарубежные технологии и материалы можно встретить на фасадах

зданий административного назначения и в жилом сегменте премиум или бизнес класса. В настоящее время ни одна компания в Российской Федерации не производит и не предоставляет на рынок все элементы навесных вентилируемых фасадов совместно.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панчук Н.Н., Логинов С.С. Современные строительные материалы, технологии производства и их влияние на архитектурный облик зданий // Дальний Восток: Проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2014. № 1. С. 156–159. EDN: TBREDF
2. Доможилов В.Ю. Эксплуатационные проблемы систем навесных фасадов зданий с воздушным вентилируемым зазором // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. №3 (1027). С. 44–46. EDN: RZGVXV
3. Попова Е.Е., Городилова А.Е., Куколев М.И. Повышение энергоэффективности домов с помощью навесных вентилируемых фасадов // Ростовский научный журнал. 2017. №12. С. 367–378. EDN: YNWZIG
4. European Commission 2021 Proposal for a Directive of the European parliament and of the council on the energy performance of buildings. [Интернет ресурс: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0802>].
5. International Energy Agency 2025 Global energy review. [Интернет ресурс: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>].
6. Бюллетень Счетной палаты РФ. Энергоэффективность жилья. [Интернет ресурс: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/39a/67v3esfn2b7d7ubf7xcunjzicuytjvj.pdf>].
7. Manioğlu G., Yılmaz Z. Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort // Energy and Buildings. 2006. Vol. 38 (3). Pp. 266–272. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.06.009
8. Pacheco R., Ordóñez J., Martínez G. Energy efficient design of building: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16 (6). Pp. 3559–3573. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.045
9. Денисова Ю.В. Выбор эффективного утеплителя в конструкции навесных вентилируемых фасадов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 26–30. EDN: QCEJOJ
10. Мотяев М.А. Азбука навесных фасадов с воздушным зазором. М.: Изд-во Стройиздат, 2005. 104 с.
11. Гришин П.А. Оптимизация технических решений устройства навесных вентилируемых фасадов на основе использования утеплителя с повышенными характеристиками влагоустойчивости // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. №5. С. 110–115.
12. Копейка Д.В. Теплотехническая однородность навесных вентилируемых фасадов и экономическая эффективность // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. №1 (135). С. 107–112. EDN: XUOLXH
13. Description and advantages of the system. [Интернет ресурс: <https://www.vivesceramica.com/en/products/solutions/technical-solutions/ventilated-facades.html>].
14. Что собой представляет вентилируемый фасад. [Интернет ресурс: <http://ensave.eu/ru/services/ventilated-facade-systems/general-Information/>].
15. Гавриленко А.А. Преимущества и недостатки отделки жилых зданий навесными вентилируемыми фасадами // Технология и организация строительного производства. 2021. С. 341–346. EDN: GBOOUU
16. Фасадная система. [Интернет ресурс: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фасадная_система].
17. Вентилируемый фасад. Виды подсистем. [Интернет ресурс: <https://fasady.pro/articles/ventiliruemyy-fasad-vidy-podsistem-2022-02-09?ysclid=miekfzghi4381696006>].
18. Баталов С.К. Анализ существующих систем навесных вентилируемых фасадов и выявление недостатков фасадных конструкций // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. №4. С. 29. EDN: AZDVCI
19. Фролов И.Д., Чупайда А.М. Навесные вентилируемые фасады в современном строительстве // Молодой ученый. 2019. №14 (252). С. 23–24. EDN: ICRWBI
20. Анненкова О.С., Беседин Д.С. Методика выбора конструктивного решения навесных вентилируемых фасадов // Ползуновский альманах. 2020. №2-1. С. 19–23. EDN: NANLHR
21. Маринова Е.И., Соловьев А.А. К вопросу о выборе рационального варианта облицовочного слоя вентилируемого фасада // Наука в современном мире: результаты исследований и открытий. Сборник научных трудов по материалам XVIII Международной научно-практической конференции. 2023. С. 152–159. EDN: PMZMG
22. Попов Д.В. Преимущества и недостатки вентилируемых фасадов // Наукосфера. 2021. №8-1. С. 70–74. EDN: NXOZQZ

23. Марковец О.К., Катилевский С.И. Особенности применения навесного вентилируемого фасада при реконструкции зданий и сооружений в России // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. №1. С. 215–218. EDN: ONYBRY
24. Уткина О.А., Сердюк С.А. Применение вентилируемых фасадов при реконструкции зданий // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. №1. С. 231–235. EDN: DHGINP
25. Константинова А.А., Пешков В.В. Оценка эффективности, качества и надежности облицовочного материала для навесного вентилируемого фасада // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Том 12. №2 (41). С. 166–173. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-166-173 EDN: LHPSCX
26. Галямичев А.В. Навесной вентилируемый фасад с облицовкой из тонких керамических панелей с клеевым креплением к каркасу // Светопрозрачные конструкции. 2017. № 4 (114). С. 48–56. EDN: ZWCXWP
27. Найдено А.В. Характеристика ограждающих конструкций на примере навесных вентилируемых фасадов // Аллея науки. 2018. Том 4. №1 (17). С. 444–448. EDN: YQGNII
28. Рыжих В.Д. Энергоэффективный дом // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 2975–2978. EDN: HEKLIN
29. Мендекеев Р.А., Мамбеталиев З.Н., Болушев А.М., Базарбеков И.Б. Навесные вентилируемые фасады - инновационная технология облицовки в строительстве зданий // Вестник Кыргызского университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2020. № 1 (67). С. 115–125. DOI: 10.35803/1694-5298.2020.1.115-125 EDN: BIUYKB
30. Кравцова А.А., Цейко А.В. Инновационные решения при применении навесных вентилируемых фасадов // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2022. №4. С. 1101–1110. EDN: IJTUBD
31. Назаров Х.Х. Поиск универсального облицовочного материала для навесного вентилируемого фасада // Вестник науки. 2021. Т. 4. №3 (36). С. 117–121. EDN: HOGXRO
32. Ventilated façade systems. [Интернет ресурс: <https://www.hilti.co.uk/content/hilti/E1/GB/en/business/business/engineering/ventilated-facade.html>].
33. Никифорова А.И., Сапрыкина Т.К. Совершенствование навесных фасадных систем // Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика. Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции. 2021. С. 47–51. EDN: GNVIVQ
34. Бардаков В.К. Сравнение различных типов облицовочных материалов // Поколение будущего: взгляд молодых ученых - 2021. Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции. 2021. С. 134–137. EDN: RWTTDE
35. Павлушкина Ю.Е., Павлушкин М.Е. Навесной вентилируемый фасад и его характеристики // Молодой ученый. 2016. №28 (132). С. 136–140. EDN: XEOJSV
36. Керимов Г.Х., Алфимов А.В., Симонов А.А. Сравнение керамогранита и металлокассет как облицовочного материала для навесного вентилируемого фасада // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2024. №3 (1075). С. 59–61. EDN: LMMYWP
37. Преимущества и недостатки керамогранита на фасад. [Интернет ресурс: <https://blog.ital-onceramica.ru/ru/sovety-dlya-remonta/keramogranit-dlya-fasada-plusi-i-minusi/?ysclid= mie8 oiy8w874380651>].
38. Ложкин В.Е., Минаков Ю.А. Навесные вентилируемые фасады - прогрессивное технологическое решение при реконструкции // Научному прогрессу - творчество молодых. 2016. №4. С. 196–198. EDN: YGHBMT
39. Анненкова О.С., Беседин Д.С. Обзор основных видов конструктивных решений навесных вентилируемых фасадов // Ползуновский альманах. 2019. №2-1. С. 31–36. EDN: TPWVHO
40. Куркаева Е.В., Токарева Е.А. Применение навесных вентилируемых фасадов при реконструкции зданий и виды облицовочных материалов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. №4. С. 110–112. EDN: VFRREF
41. Усова А.В., Бойкова А.В. Вентилируемый фасад, как энергоэффективная ограждающая конструкция // Тенденции развития науки и образования. 2020. №68-3. С. 68–71. DOI: 10.18411/lj-12-2020-113 EDN: ZHOQBT
42. Вентилируемые фасады с натуральной глиняной терракотой. [Интернет ресурс: <https://ventilated-facade.com/catalog/Ventilruemye-fasady-s-naturalnoj-glinyanoj-terrakotoj>].
43. Терракотовая панель. [Интернет ресурс: <https://www.lopochina.ru/terracotta-panel.html>].
44. Мендекеев Р.А., Мамбеталиев З.Н., Болушев А.М., Базарбеков И.Б. Навесные вентилируемые фасады - инновационная технология облицовки в строительстве зданий // Вестник кыргызского государственного университета строи-

тельства, транспорта и архитектуры им. Н. Иса-
нова. 2020. №1 (67). С. 115–125. DOI:
10.35803/1694-5298.2020.1.115-125 EDN:
BIUYKB

Информация об авторах

Пириева Лейла Юнисовна, старший преподаватель кафедры архитектурных конструкций.
E-mail: p-leila@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия,
308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Тарасенко Виктория Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры архитектурных конструкций.
E-mail: vell.30@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия,
308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Пириев Юнис Селим оглы, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства.
E-mail: p-yunis@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Рос-
сия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Василов Дмитрий Александрович, студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструк-
ций. E-mail: dimkkcu0808@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, 308012, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.04.2025 г.

© Пириева Л.Ю., Тарасенко В.Н., Пириев Ю.С., Василов Д.А., 2026

***Pirieva L.Y., Tarasenko V.N., Piriev Y.S., Vasilov D.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
*E-mail: p-leila@mail.ru

MODERN FACADE SYSTEMS AS DOMINANTS OF RECREATIONAL SPACE

Abstract. The appearance of residential and public buildings plays a vital role in modern urban archi-
tecture. Due to their high functionality, wide range of options, and reduced susceptibility to damage compared
to other façade systems, architects often choose curtain wall ventilated facade systems. These systems offer a
number of advantages, including architectural (the variety of materials used, the ability to combine them, and
the flexibility of architectural and design solutions), technological (the speed of installation of façade struc-
tures and the ability to perform installation work year-round), and economic (the payback of curtain wall
ventilated facade systems is achieved within 5 years due to reduced heating costs in winter and reduced energy
consumption for air conditioning).

The latest building materials used for cladding the load-bearing and enclosing structures of buildings
impart a unique exterior style to both capital construction projects and renovations. The main distinguishing
feature of these new façade systems is the combination of a beautiful exterior, high functionality, reliability,
durability, and practicality. Cladding materials possess sufficiently high strength characteristics, allowing
their use in various climatic zones and the combination of different material options within a single subsystem
in curtain wall systems.

This article analyzes the experience of using curtain wall ventilated facades with modern cladding ma-
terials, which can transform the appearance of residential or public buildings.

Keywords: ventilated curtain wall, cladding materials, facade finishing, composite panels, facade sub-
systems.

REFERENCES

1. Panchuk N.N., Loginov S.S. Modern
building materials, production technologies and their
impact on the architectural appearance of buildings
[Sovremennye stroitel'nye materialy, tekhnologii
proizvodstva i ikh vliyanie na arkhitekturnyj oblik
zdaniy]. Far East: Problems of Development of the
Architectural and Construction Complex. 2014. No.
1. Pp. 156–159. EDN: TBREDF (rus)

2. Domozhilov V.Yu. Operational problems
of curtain wall facade systems with air ventilated gap
[Ekspluatatsionnye problemy sistem navesnykh
fasadov zdaniy s vozdushnym ventiliruyemym
zazorom]. BST: Bulletin of Construction Equipment.
2020. No. 3 (1027). Pp. 44–46. EDN: RZGVXV
(rus)

3. Popova E.E., Gorodilova A.E., Kukolev
M.I. Improving energy efficiency of houses using

curtain ventilated facades [Povyshenie energoefektivnosti domov s pomoshch'yu navesnykh ventiliruyemykh fasadov]. Rostov Scientific Journal. 2017. No. 12. Pp. 367–378. EDN: YNWZIG (rus)

4. European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings. 2021. [Internet resource: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0802>].

5. International Energy Agency. Global Energy Review. 2025. [Internet resource: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>].

6. Bulletin of the Accounts Chamber of the Russian Federation. Energy efficiency of housing [Energoeffektivnost' zhil'ya]. [Internet resource: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/39a/67v3esfn2b7d7ubf7xcurijzieyytjvj.pdf>]. (rus)

7. Manioğlu G., Yılmaz Z. Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. Energy and Buildings. 2006. Vol. 38 (3). Pp. 266–272. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.06.009

8. Pacheco R., Ordóñez J., Martínez G. Energy efficient design of building: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16 (6). Pp. 3559–3573. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.045

9. Denisova Yu.V. Selection of effective insulation in the design of curtain wall ventilated facades // Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 4. P. 26–30. EDN: QCEJOJ

10. Motyaev M.A. ABC of curtain facades with air gap [Azbuka navesnykh fasadov s vozdushnym zazorom]. Moscow: Stroyizdat Publ., 2005. 104 p. (rus)

11. Grishin P.A. Optimization of technical solutions for curtain ventilated facades based on the use of insulation with improved moisture resistance characteristics [Optimizatsiya tekhnicheskikh reshenij ustrojstva navesnykh ventiliruyemykh fasadov na osnove ispol'zovaniya uteplitelya s povyshennymi kharakteristikami vlagostojkosti]. International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral. 2020. No. 5. Pp. 110–115. (rus)

12. Kopeika D.V. Thermal homogeneity of curtain ventilated facades and economic efficiency [Teplotekhnicheskaya odnorodnost' navesnykh ventiliruyemykh fasadov i ekonomicheskaya effektivnost']. Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2019. No. 1 (135). Pp. 107–112. EDN: XUOLXH (rus)

13. Description and advantages of the system. [Internet resource: <https://www.vivesceramica.com/en/products/solutions/technical-solutions/ventilated-facades.html>].

14. What is a ventilated facade [Chto soboj predstavlyayet ventiliruyemyj fasad]. [Internet resource: <http://ensave.eu/ru/services/ventilated-facade-systems/general-Information/>]. (rus)

15. Gavrilenko A.A. Advantages and disadvantages of finishing residential buildings with curtain ventilated facades [Preimushchestva i nedostatki otdelki zhilykh zdaniy navesnymi ventiliruyemyimi fasadami]. Technology and Organization of Construction Production. 2021. Pp. 341–346. EDN: GBOOUU (rus)

16. Facade system [Fasadnaya sistema]. [Internet resource: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>]. (rus)

17. Ventilated facade. Types of subsystems [Ventiliruyemyj fasad. Vidy podsistem]. [Internet resource: <https://fasady.pro/articles/ventiliruyemyj-fasad-vidy-podsistem-2022-02-09?ysclid=miekbghi4381696006>]. (rus)

18. Batalov S.K. Analysis of existing curtain ventilated facade systems and identification of facade design shortcomings [Analiz sushchestvuyushchikh sistem navesnykh ventiliruyemykh fasadov i vyyavlenie nedostatkov fasadnykh konstruksij]. International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral. 2020. No. 4. P. 29. EDN: AZDVCI (rus)

19. Frolov I.D., Chupaida A.M. Curtain ventilated facades in modern construction [Navesnye ventiliruyemye fasady v sovremennom stroitel'stve]. Young Scientist. 2019. No. 14 (252). Pp. 23–24. EDN: ICRWBI (rus)

20. Annenkova O.S., Besedin D.S. Methodology for selecting structural solutions for curtain ventilated facades [Metodika vybora konstruktivnogo resheniya navesnykh ventiliruyemykh fasadov]. Polzunov Almanac. 2020. No. 2-1. Pp. 19–23. EDN: NANLHR (rus)

21. Marinova E.I., Solovyev A.A. On the issue of selecting a rational option for the cladding layer of a ventilated facade [K voprosu o vybere ratsional'nogo varianta oblitsovochnogo sloya ventiliruemogo fasada]. Science in the Modern World: Research Results and Discoveries. Collection of scientific papers based on the materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference. 2023. Pp. 152–159. EDN: PMZMGM (rus)

22. Popov D.V. Advantages and disadvantages of ventilated facades [Preimushchestva i nedostatki ventiliruyemykh fasadov]. Naukosfera. 2021. No. 8-1. Pp. 70–74. EDN: NXOZQZ (rus)

23. Markovets O.K., Katilevsky S.I. Features of using curtain ventilated facades in the reconstruction of buildings and structures in Russia [Osobennosti primeneniya navesnogo ventiliruemogo fasada pri rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy v Rossii]. Science. Engineering. Technologies (Polytechnic

Bulletin). 2021. No. 1. Pp. 215–218. EDN: ONY-BRY (rus)

24. Utkina O.A., Serdyuk S.A. Application of ventilated facades in building reconstruction [Primenenie ventiliruyemykh fasadov pri rekonstruktsii zdaniy]. Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). 2021. No. 1. Pp. 231–235. EDN: DHGINP (rus)

25. Konstantinova A.A., Peshkov V.V. Assessment of efficiency, quality and reliability of cladding material for curtain ventilated facade [Otsenka effektivnosti, kachestva i nadezhnosti oblitsovochnogo materiala dlya navesnogo ventiliruemogo fasada]. Proceedings of Higher Education Institutions. Investment. Construction. Real Estate. 2022. Vol. 12. No. 2 (41). Pp. 166–173. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-2-166-173 EDN: LHP-SCK (rus)

26. Galyamichev A.V. Curtain ventilated facade with cladding of thin ceramic panels with adhesive fixing to the frame [Navesnoj ventiliruyemyj fasad s oblitsovkoy iz tonkikh keramicheskikh panelej s kleevum krepleniem k karkasu]. Transparent Structures. 2017. No. 4 (114). Pp. 48–56. EDN: ZWCXWP (rus)

27. Naydenko A.V. Characteristics of building envelopes using curtain ventilated facades as an example [Kharakteristika ograzhdayushchikh konstruktсий na primere navesnykh ventiliruyemykh fasadov]. Science Alley. 2018. Vol. 4. No. 1 (17). Pp. 444–448. EDN: YQGNII (rus)

28. Ryzhikh V.D. Energy-efficient house [Ergoefektivnyj dom]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. Pp. 2975–2978. EDN: XEKLIN (rus)

29. Mendekeev R.A., Mambetaliev Z.N., Bolushev A.M., Bazarbekov I.B. Curtain ventilated facades – an innovative cladding technology in building construction [Navesnye ventiliruyemye fasady – innovatsionnaya tekhnologiya oblitsovki v stroitel'stve zdaniy]. Bulletin of the Kyrgyz University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov. 2020. No. 1 (67). Pp. 115–125. DOI: 10.35803/1694-5298.2020.1.115-125 EDN: BIUYKB (rus)

30. Kravtsova A.A., Tseyko A.V. Innovative solutions in the application of curtain ventilated facades [Innovatsionnye resheniya pri primenении navesnykh ventiliruyemykh fasadov]. International Journal of Applied Sciences and Technologies Integral. 2022. No. 4. Pp. 1101–1110. EDN: IJTUBD (rus)

31. Nazarov Kh.Kh. Search for a universal cladding material for curtain ventilated facade [Poisk universal'nogo oblitsovochnogo materiala dlya

navesnogo ventiliruemogo fasada]. Bulletin of Science. 2021. Vol. 4. No. 3 (36). Pp. 117–121. EDN: HOGXRO (rus)

32. Ventilated façade systems. [Internet resource: <https://www.hilti.co.uk/content/hilti/E1/GB/en/business/engineering/ventilated-facade.html>].

33. Nikiforova A.I., Saprykina T.K. Improvement of curtain facade systems [Sovershenstvovanie navesnykh fasadnykh sistem]. Current Issues of Modern Science: Theory, Methodology, Practice, Innovation. Collection of scientific articles based on the materials of the V International Scientific and Practical Conference. 2021. Pp. 47–51. EDN: GNVIQV (rus)

34. Bardakov V.K. Comparison of different types of cladding materials [Sravnenie razlichnykh tipov oblitsovochnykh materialov]. Generation of the Future: View of Young Scientists – 2021. Collection of scientific articles of the 10th International Youth Scientific Conference. 2021. Pp. 134–137. EDN: RWTTE (rus)

35. Pavlushkina Yu.E., Pavlushkin M.E. Curtain ventilated facade and its characteristics [Navesnoj ventiliruyemyj fasad i ego kharakteristiki]. Young Scientist. 2016. No. 28 (132). Pp. 136–140. EDN: XEOJSV (rus)

36. Kerimov G.Kh., Alfimov A.V., Simonov A.A. Comparison of porcelain stoneware and metal cassettes as cladding material for curtain ventilated facade [Sravnenie keramogranita i metallokasset kak oblitsovochnogo materiala dlya navesnogo ventiliruemogo fasada]. BST: Bulletin of Construction Equipment. 2024. No. 3 (1075). Pp. 59–61. EDN: LMMYWP (rus)

37. Advantages and disadvantages of porcelain stoneware for facades [Preimushchestva i nedostatki keramogranita na fasad]. [Internet resource: <https://blog.italonceramica.ru/ru/sovety-dlya-remonta/keramogranit-dlya-fasada-plus-i-minusi/?ysclid=mie8oiy8w874380651>]. (rus)

38. Lozhkin V.E., Minakov Yu.A. Curtain ventilated facades – a progressive technological solution for reconstruction [Navesnye ventiliruyemye fasady – progressivnoe tekhnologicheskoe reshenie pri rekonstruktsii]. To Scientific Progress – Creativity of the Young. 2016. No. 4. Pp. 196–198. EDN: YGHBMT (rus)

39. Annenkova O.S., Besedin D.S. Review of main types of structural solutions for curtain ventilated facades [Obzor osnovnykh vidov konstruktivnykh reshenij navesnykh ventiliruyemykh fasadov]. Polzunov Almanac. 2019. No. 2-1. Pp. 31–36. EDN: TPWVHO (rus)

40. Kurkaeva E.V., Tokareva E.A. Application of curtain ventilated facades in building reconstruction and types of cladding materials [Primenenie

navesnykh ventiliruyemykh fasadov pri rekonstruktsii zdaniy i vidy oblitsovochnykh materialov]. Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). 2021. No. 4. Pp. 110–112. EDN: VFRREF (rus)

41. Usova A.V., Boykova A.V. Ventilated facade as an energy-efficient building envelope [Ventiliruyemyj fasad, kak energoefektivnaya ogra-zhdayushchaya konstruktsiya]. Trends in the Development of Science and Education. 2020. No. 68-3. Pp. 68–71. DOI: 10.18411/lj-12-2020-113 EDN: ZHOQBT (rus)

42. Ventilated facades with natural clay terracotta [Ventiliruyemye fasady s natural'noj glinyanoj terrakotoj]. [Internet resource: <https://ventilated-facade.com/catalog/Ventiliruyemye-fasady-s-natural-noj-glinyanoj-terrakotoj>]. (rus)

43. Terracotta panel [Terrakotovaya panel']. [Internet resource: <https://www.lopochina.ru/terracotta-panel.html>]. (rus)

44. Mendekeev R.A., Mambetaliev Z.N., Bolushev A.M., Bazarbekov I.B. Curtain ventilated facades – an innovative cladding technology in building construction [Navesnye ventiliruyemye fasady – innovatsionnaya tekhnologiya oblitsovki v stroitel'stve zdaniy]. Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov. 2020. No. 1 (67). Pp. 115–125. DOI: 10.35803/1694-5298.2020.1.115-125 EDN: BIUYKB (rus)

45. Linear panels for ventilated facades [Linearnye paneli dlya ventfasada]. [Internet resource: <https://ventfasady.ru/fasadnie-paneli/linearnie-paneli-dlya-ventfasada?ysclid=miggetobzg250568214>]. (rus)

Information about the authors

Pirieva, Leila Y. Senior lecturer at the department of architectural structures. E-mail: p-leila@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukov, 46.

Tarasenko, Victoria N. PhD. E-mail: vell.30@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukov, 46.

Piriev, Yunis S. Senior lecturer at the department of construction and urban economy. E-mail: p-yunis@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, St. Kostukov, 46.

Vasilov, Dmitry A. Undergraduate Student at the Department of Building Materials Science, Products and Structures. e-mail: Dimkkcuy0808@gmail.com, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Received 09.04.2025

Для цитирования:

Пириева Л.Ю., Тарасенко В.Н., Пириев Ю.С., Васильев Д.А. Современные фасадные системы как доминанты рекреационного пространства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 100–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-100-114

For citation:

Pirieva L.Y., Tarasenko V.N., Piriev Y.S., Vasilov D.A. Modern facade systems as dominants of recreational space. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 100–114. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-100-114

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124

¹Цюе У., ¹Рачков М.Ю., ²Гапоненко Е.В.¹Московский политехнический университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: garonenkobel@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ РОБОТА МЕТОДОМ АКТИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ И СТРАТЕГИЕЙ НАСЫЩЕНИЯ

Аннотация. Объектом исследования выступает мобильный реконфигурируемый робот с гибридным колесно-гусеничным движителем, обладающий способностью трансформировать кинематическую структуру шасси для преодоления высоких вертикальных препятствий. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения надежного функционирования механизмов трансформации при использовании бюджетной компонентной базы. В работе решается задача синтеза системы управления, устойчивой к аппаратным ограничениям (зоны нечувствительности, люфты) и нелинейностям приводов. Предложен оригинальный метод активного вертикального сканирования («Stop-and-Scan»), который позволяет компенсировать физические ограничения стандартных ультразвуковых сенсоров, такие как широкая диаграмма направленности и зеркальное отражение. Метод базируется на анализе градиента дистанции при вертикальном перемещении датчика, что обеспечивает достоверное определение геометрических параметров препятствий. Особое внимание уделено управлению линейными актуаторами с червячной передачей, характеризующимися значительным сухим трением. Синтезирован закон управления с использованием высоких коэффициентов усиления в режиме насыщения, позволяющий компенсировать зону нечувствительности привода без потери устойчивости. Результаты математического моделирования и натурных испытаний подтверждают, что предложенный подход обеспечивает минимизацию статической ошибки позиционирования и способствует повышению общей проходимости робота.

Ключевые слова: гибридная кинематика, реконфигурируемый робот, активное сканирование, ультразвуковая локация, управление с насыщением, преодоление препятствий, Arduino Mega.

Введение. В настоящее время развитие мобильной робототехники смещается от создания узкоспециализированных машин к разработке многофункциональных адаптивных систем. Такие роботы востребованы в задачах поисково-спасательных операций, инспекции промышленных объектов и мониторинга труднодоступных территорий [1, 2]. Ключевой проблемой при этом остается обеспечение проходимости. Традиционные колесные платформы обладают высокой энергоэффективностью, но ограничены в преодолении вертикальных препятствий (порогов, ступеней, завалов). Гусеничные шасси обеспечивают высокое сцепление с грунтом, но проигрывают в скорости и маневренности на твердых покрытиях.

Традиционные колесные платформы обладают высоким КПД и скоростью на ровных поверхностях, но их проходимость ограничена диаметром колеса. Они не способны преодолевать вертикальные препятствия (пороги, ступени), высота которых превышает радиус движителя. Гусеничные шасси обеспечивают высокое сцепление с грунтом и проходимость, но проигрывают в скорости, маневренности на твердых покрытиях и энергопотреблении.

Решением данного противоречия является применение гибридных реконфигурируемых схем, сочетающих преимущества колесного и гусеничного хода [3]. Современные исследования [4, 5] подтверждают, что способность изменять геометрию шасси (клиренс, угол атаки гусениц, длину колесной базы) позволяет роботу адаптироваться под текущий рельеф. Однако реализация такой адаптивности сопряжена со сложными задачами управления. В отличие от жестких конструкций, реконфигурируемые системы требуют точной координации множества приводов. Динамика таких роботов на пересеченной местности осложняется нелинейными эффектами взаимодействия движителя с грунтом [6, 7].

Критически важным режимом для таких роботов является «геометрическое замыкание» — состояние, при котором робот фиксирует свою форму для механического зацепления за препятствие, снимая нагрузку с электроприводов [8]. Однако вход в такое состояние требует высокой точности позиционирования механических узлов, что сложно реализовать на практике из-за двух фундаментальных факторов.

Во-первых, это ограничения сенсорной системы бюджетного класса. Использование лида-

ров или стереокамер в массовых сервисных роботах часто экономически нецелесообразно. Стандартные ультразвуковые сенсоры являются доступной альтернативой, но имеют широкую диаграмму направленности (порядка $15-30^\circ$) и подвержены переотражениям сигнала [9]. Существующие методы комплексирования датчиков [10, 11] повышают качество восприятия, но для задач точной стыковки с препятствием требуется специализированный алгоритм, исключающий «слепые зоны».

Во-вторых, это ярко выраженная нелинейность исполнительных механизмов. Бюджетные актуаторы, особенно линейные приводы с червячной передачей, характеризуются существенным сухим трением и зоной нечувствительности [12]. Традиционные методы линейного ПИД-регулирования в таких условиях оказываются неэффективными: малые управляющие сигналы не могут преодолеть порог страгивания, что приводит к накоплению статической ошибки позиционирования [13]. Для компенсации нелинейностей наиболее перспективными выглядят стратегии управления с переменной структурой и насыщением [14, 15].

Целью данной работы является разработка и верификация комплексной системы управления мобильным роботом, объединяющей метод активного сканирования среды для точного детектирования препятствий и стратегию управления

с насыщением для компенсации нелинейностей приводов.

Аппаратная архитектура системы. Функциональная схема аппаратной реализации системы управления мобильного трансформируемого робота приведена на рис. 1. Центральным элементом является микроконтроллер Arduino Mega 2560, который выполняет сбор измерительной информации, формирование оценок состояния, а также генерацию управляющих ШИМ-сигналов для исполнительных приводов.

Система управления включает оптические энкодеры VEX Optical Shaft Encoder, формирующие квадратурные импульсы, пропорциональные угловому перемещению валов приводов/механизма трансформации, а также ультразвуковой дальномер HC-SR04, установленный на направляющих и обеспечивающий измерение расстояния до препятствий/поверхности в направлении сканирования.

Сигналы энкодеров поступают на входы Arduino и обрабатываются с использованием аппаратных прерываний, что обеспечивает устойчивый подсчет импульсов при параллельной работе нескольких датчиков. Дальномер HC-SR04 подключен к контроллеру по цифровым входам, измеренная дальность используется в контуре оценки внешней обстановки и при движении.

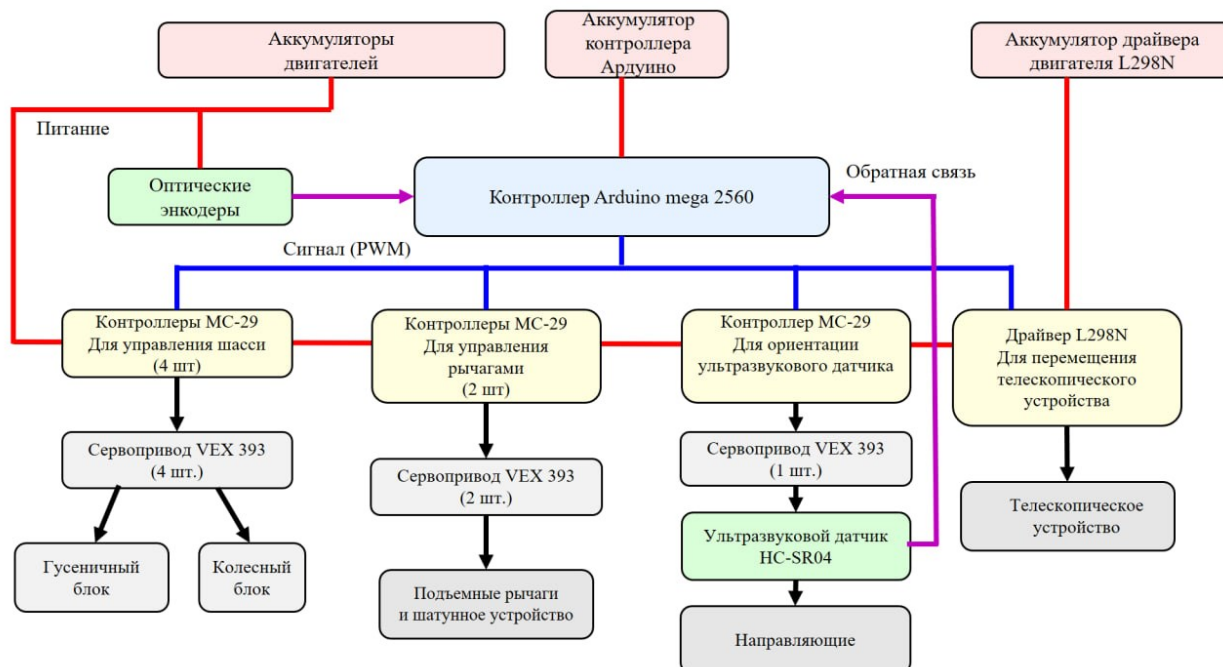


Рис. 1. Схема аппаратной реализации системы управления

Исполнительный уровень представлен двумя группами приводов:

1. Тяговые приводы на базе двигателей VEX 393, управляемые через драйверы Motor Controller 29. Arduino формирует ШИМ-сигналы,

задающие режимы скорости и направления вращения двигателей для колесного и гусеничного блоков, а также для приводов механизма подъема и шатунного устройства.

2. Линейные актуаторы телескопического устройства, управляемые через двухканальные

драйверы L298N. Они обеспечивают реверс и динамическое торможение для позиционирования штока и фиксации заданного положения.

Обратная связь в системе реализована по измерениям энкодеров и по данным дальномера. Эти измерения используются в вычислительных алгоритмах на Arduino для замыкания дискретных контуров управления (PID-регуляторы) и логики режимов.

Питание организовано отдельно для снижения взаимных помех и просадок напряжения. На схеме отдельно обозначены линии питания, ШИМ-управления и механических связей.

Метод активного сканирования «Stop-and-Scan». Традиционные методы ультразвуковой локации [9, 16] предполагают измерение дистанции при движении робота или стационарном положении датчика. Однако из-за широкого конуса распространения волны ($\approx 15^\circ$) измерение высоты ступенчатого препятствия с одной точки дает большую погрешность.

Для решения этой проблемы разработан метод активного вертикального сканирования. Суть метода заключается в физическом перемещении сенсора вдоль вертикальной оси при неподвижном шасси. Алгоритм работы системы (рис. 2) включает следующие этапы:

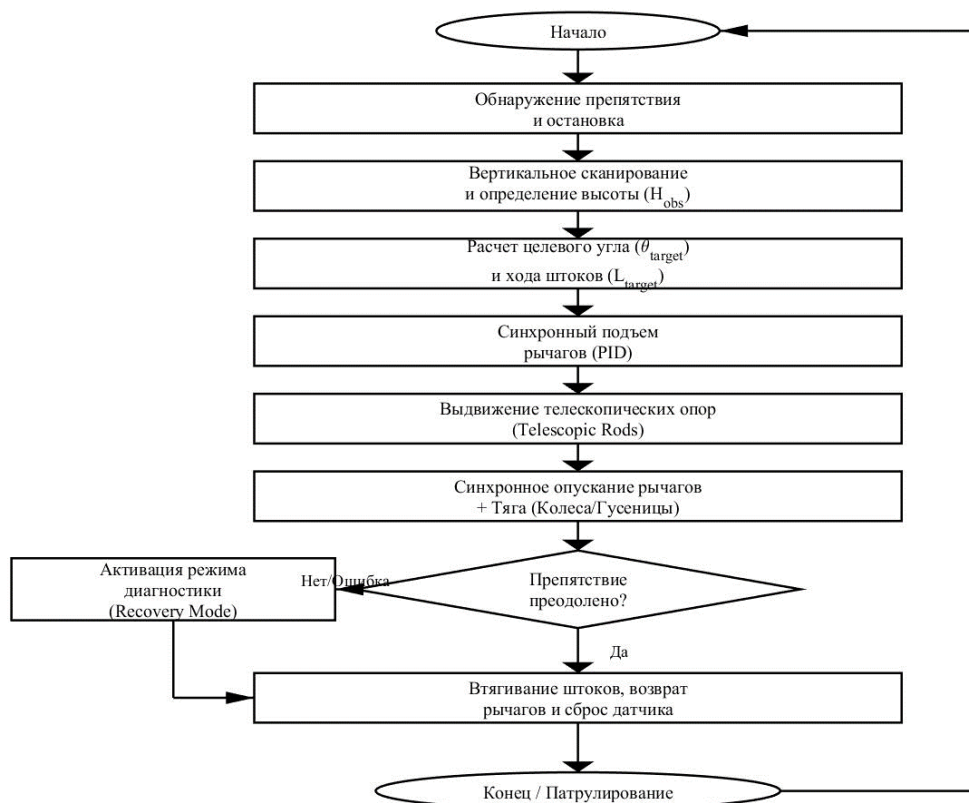


Рис. 2. Блок-схема алгоритма активного сканирования и реконфигурации

Алгоритм работы системы управления разделен на три последовательных этапа: восприятие среды, принятие решений и исполнение.

Этап 1. Восприятие и принятие решений.

1. Обнаружение препятствия и остановка.

Робот движется по заданному маршруту и непрерывно контролирует пространство впереди ультразвуковым дальномером. Когда датчик обнаруживает препятствие впереди, срабатывает прерывание, робот немедленно прекращает движение и переходит в режим «Stop-and-Scan».

2. Вертикальное сканирование и определение высоты H_{obs} .

Поскольку ультразвуковой дальномер обладает широким углом направленности ($\approx 15^\circ$), что приводит к неоднозначности отражений и снижению точности при фиксированном положении датчика, в системе реализовано активное управление вертикальным перемещением кронштейна с датчиком.

Текущая высота сенсора $h_{sens}(t)$ получается путем интегрирования вертикальной скорости v_z :

$$h_{sens}(t) = h_{init} + \int_0^t v_z(\tau) d\tau,$$

где h_{init} – начальная высота, v_z – скорость вертикального перемещения сенсора.

Система не использует показания дальности напрямую, а вычисляет пространственный градиент расстояния D относительно изменения высоты $\nabla D(h)$ для идентификации верхней кромки препятствия:

$$\nabla D(h) \approx \frac{D(t) - D(t - \Delta t)}{v_z \cdot \Delta t}$$

Логика принятия решения: когда абсолютное значение градиента превышает адаптивный порог Δ_{thr} (т.е. $|\nabla D(h)| > \Delta_{thr}$), фиксируется обнаружение края препятствия, и текущая высота принимается за высоту препятствия H_{obs} . Этот метод позволяет удерживать ошибку измерения в пределах 1,5%.

3. Расчет целевых параметров (угла θ_{target} и хода штоков L_{target})

На основе измеренной высоты препятствия H_{obs} система решает уравнения обратной кинематики и рассчитывает целевую конфигурацию, в которую должен трансформироваться робот.

Управление реализуется по двум взаимосвязанным каналам: первый канал задаёт целевой угол наклона передних рычагов (соответствует θ_{target} на блок-схеме в тексте), второй канал задаёт целевую длину телескопических штоков L_{target} .

Этап 2. Реконфигурация и нелинейное управление.

4. Синхронный подъем рычагов.

Это ключевой этап алгоритма. Для обеспечения точного достижения расчетного угла наклона θ_{target} , необходимо компенсировать влияние существенных нелинейных факторов, таких как сухое трение и люфты в механических передачах. В качестве альтернативы классическому линейному ПИД-регулятору в работе предлагается закон управления с насыщением и высоким коэффициентом усиления. Использование режима насыщения позволяет временно разомкнуть контур обратной связи, фиксируя управляющее воздействие на предельном уровне (по знаку и величине).

Уравнение управления в дискретной форме имеет вид:

$$u_k = \text{sat} \left(K_p e_k + K_I \sum e_j + K_D \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right),$$

где e_k – текущая ошибка положения,

$\text{sat} \left(K_p e_k + K_I \sum e_j + K_D \frac{e_k - e_{k-1}}{T_s} \right)$ — функция насыщения, ограничивающая напряжение в допустимом для драйвера диапазоне.

Пропорциональный коэффициент K_p устанавливается большого значения (в работе принято $K_p = 45$). Это приводит к тому, что даже

при очень малой ошибке e_k контроллер выдает максимальное напряжение U_{max} . Такой высокий коэффициент усиления мгновенно создает момент, достаточный для преодоления силы трения покоя, устраняя «мертвую зону» и статическую ошибку, характерные для обычного управления (снижение с 8,0 мм до 0,2 мм).

5. Выдвижение телескопических опор.

Одновременно с подъемом передних рычагов, линейные приводы выдвигают телескопический механизм на целевую длину L_{target} . Здесь также применяется вышеописанная стратегия управления с насыщением для обеспечения точности.

6. Синхронное опускание и тяга.

Робот опирает передние рычаги на препятствие и, используя тяговое усилие гусениц и колес, поднимает все шасси.

Этап 3. Завершение и сброс.

7. Подтверждение преодоления и сброс.

На этом этапе производится проверка, полностью ли корпус робота преодолел препятствие.

Если условие выполнено, происходит вытягивание штоков, возврат рычагов и сенсора в исходное положение, робот возвращается в исходную конфигурацию, завершает текущий цикл и продолжает движение. Если условие не выполнено или возникла ошибка, активизируется диагностическая программа для восстановления движения или формируется сообщение об ошибке.

Структура двухканальной системы управления. Для реализации точной реконфигурации на основе данных сканирования (H_{obs}) система управления была декомпозирована на два независимых канала.

На рисунке 3 представлена структурная схема системы, декомпозированная на два независимых контура управления. Элемент сравнения (обозначенный как «-») выполняет алгебраическое суммирование задающего воздействия $g(t)$ и сигнала отрицательной обратной связи, формируя сигнал ошибки $e(t)$. Регулятор $W_c(s)$, реализованный программно на микроконтроллере, преобразует ошибку в управляющее напряжение $u(t)$ в соответствии с синтезированным законом управления с насыщением. Объект управления $W_o(s)$ представляет собой динамическую модель электропривода и механической передачи, выходной величиной которой является кинематический параметр $y(t)$ (высота или скорость). Звено $W_{fb}(s)$ описывает передаточную функцию датчиков (энкодеров), замыкающих контур управления.

Таблица 1

Соответствия математических символов и их физического смысла в работе

Символ	Название (Теория управления)	Физический смысл в системе
$g(t)$	Задающее воздействие	Цель. Для Канала 1: Целевая высота подъема h_{ref} или угол рычагов. Для Канала 2: Целевая скорость V_{ref} или дистанция перемещения.
$\epsilon(t)$	Ошибка рассогласования	Разница. Отклонение текущего положения робота от заданного. Это значение поступает на вход ПИД-регулятора.
$W_c(s)$	Передаточная функция регулятора	Программа (Arduino). Алгоритм (ПИД + Насыщение), который вычисляет, какую мощность нужно подать на мотор, чтобы устранить ошибку ϵ .
$u(t)$	Управляющее воздействие	Напряжение/PWM. Сигнал широтно-импульсной модуляции (0–255), который микроконтроллер посылает на драйвер мотора (L298N или MC-29).
$W_o(s)$	Передаточная функция объекта	Железо. Совокупность драйвера, электродвигателя, редуктора и механической нагрузки (рычаги, колеса). Преобразует напряжение в движение.
$y(t)$	Выходная величина	Результат. Реальная текущая высота робота $h(t)$ или реальная скорость $V(t)$.
$W_{fb}(s)$	Передаточная функция обратной связи	Датчик. Энкодер или потенциометр. Он измеряет физический выходу $y(t)$ и преобразует его в цифровой сигнал для сравнения с целью $g(t)$.

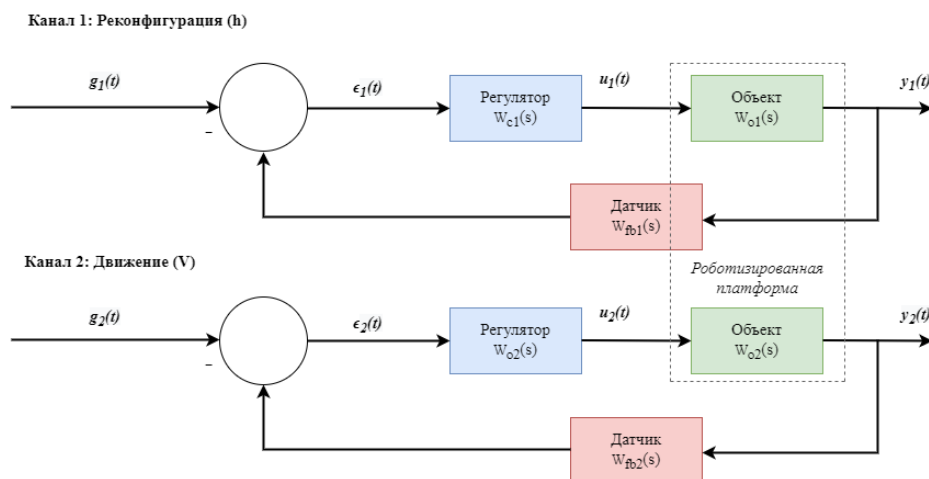


Рис. 3. Архитектура системы управления с вычислительными блоками

Синтез двухканальной системы управления реконфигурацией. Проектирование системы управления базируется на методах мехатронного подхода [17, 18]. Система декомпозирована на два канала: управление углом наклона

(α) и длиной вылета рычагов (L). Для исследования динамики разработана модель в MATLAB/Simulink (рис. 4), учитывающая ограничения напряжения драйверов (± 12 В).

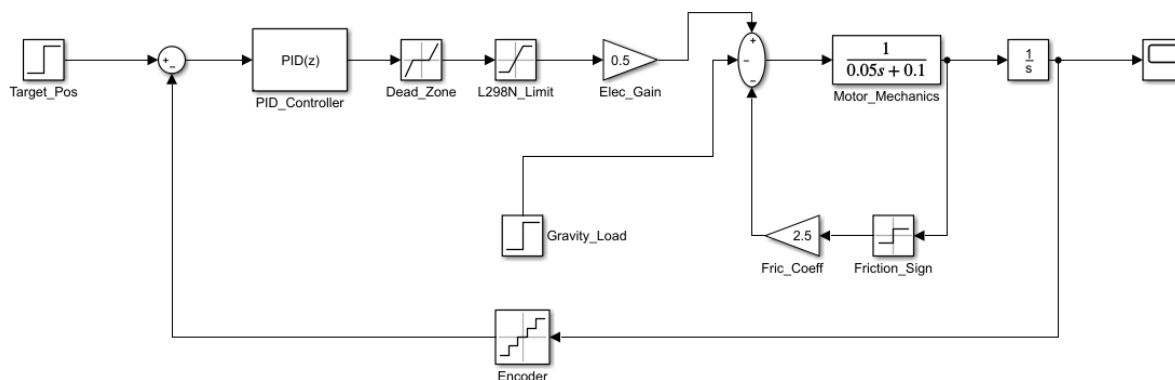


Рис. 4. Структурная схема нелинейной модели управления приводом

Схема состоит из следующих ключевых блоков:

1. ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие $u(t)$ на основе ошибки рассогласования $e(t) = q_{ref} - q_{actual}$. В рамках предложенного подхода реализован алгоритм с высоким коэффициентом пропорционального усиления ($K_p = 45$) для обеспечения быстродействия.

2. Блок насыщения моделирует аппаратные ограничения драйвера двигателя L298N. Этот блок ограничивает выходное напряжение регулятора диапазоном $[-12V, +12V]$, что соответствует напряжению бортовой сети робота. Это позволяет анализировать поведение системы в нелинейном режиме, когда регулятор «упирается» в потолок питания.

3. Динамика исполнительного механизма (актуатора) описывается передаточной функцией второго порядка $W(s) = \frac{K}{s(T_s+1)}$, отражающей электромеханические свойства ротора.

4. Блок сухого трения является критически важным элементом модели, имитирующим зону нечувствительности редуктора. Он вводит в систему возмущение, препятствующее началу движения при малых напряжениях ($U < U_{dead} \approx 3V$), что и вызывает появление статической ошибки в классических системах, которую устраняет предложенный метод высокого усиления.

Анализ переходных процессов в линейной зоне (без учета сухого трения) показывает, что система с подобранными коэффициентами ($K_p = 9$, $K_d = 3$) обладает аperiodическим характером переходного процесса без перерегулирования, как показано на рис. 5, что критически важно для предотвращения механических ударов.

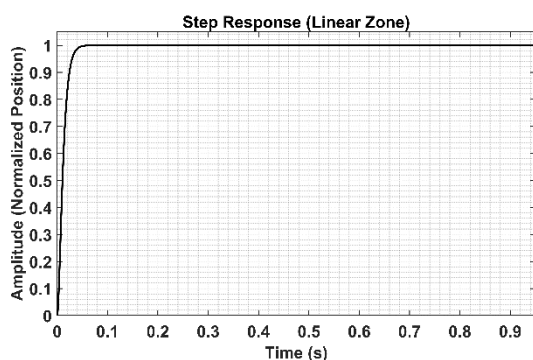


Рис. 5. Переходная характеристика системы позиционирования в линейной зоне

На рис. 5 представлена реакция системы на единичное ступенчатое воздействие в идеализированных условиях, когда моментом сухого трения можно пренебречь. Моделирование выполнено с настроечными коэффициентами ПИД-регулятора $K_p = 9$ и $K_d = 3$.

Анализ кривой на рис. 5 показывает, что процесс установления происходит монотонно, без колебаний и перерегулирования (выход за уровень 1.0 отсутствует). Это является критическим требованием для механизма реконфигурации, так как любое перерегулирование могло бы привести к жесткому механическому удару рычагов об ограничитель. Время нарастания (t_r) составляет менее 0.1 с, что свидетельствует о высокой динамике системы в линейной зоне.

Исследование нелинейной динамики и обоснование стратегии насыщения. В реальных условиях стандартные приводы обладают зоной нечувствительности, вызванной сухим трением. Применение линейного управления в таких системах ограничено физическими пределами привода [12]. Для оценки влияния нелинейностей проведено моделирование с консервативными настройками линейного регулятора ($K_p = 1$). Как видно из рис. 6, система останавливается с недопустимой статической ошибкой $\delta_{st} \approx 8,0$ мм, так как управляющее напряжение не может преодолеть порог страгивания.

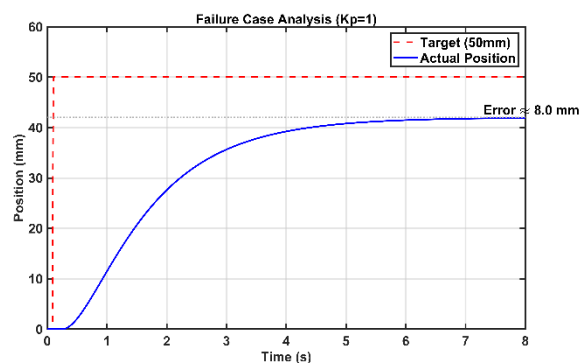


Рис. 6. Возникновение статической ошибки при линейном управлении с малым коэффициентом усиления

Следует отметить, что даже использование номинальных коэффициентов линейного регулятора ($K_p = 9$), хотя и уменьшает ошибку, не позволяет достичь требуемой субмиллиметровой точности из-за физической природы трения.

Для полного устранения ошибки применена стратегия управления с использованием высокого коэффициента усиления в условиях ограничений на управление.

Суть метода заключается в намеренном введении привода в режим отсечки. Насыщение сигнала — это состояние, когда обратная связь оказывается фактически разомкнутой, т.е. сигнал ошибки (в пределах зоны насыщения) не влияет на управляющее воздействие и остается неизменным по величине (максимальное напряжение U_{max}), меняясь лишь по знаку.

Увеличение коэффициента до $K_p = 45$ приводит к тому, что даже при минимальном рассогласовании регулятор выдает максимальное напряжение, мгновенно преодолевая момент трения покоя. Результаты моделирования (рис. 7)

показывают снижение расчетной статической ошибки до 0,2 мм, что гарантировало надежное геометрическое замыкание механизма в ходе натурных испытаний.

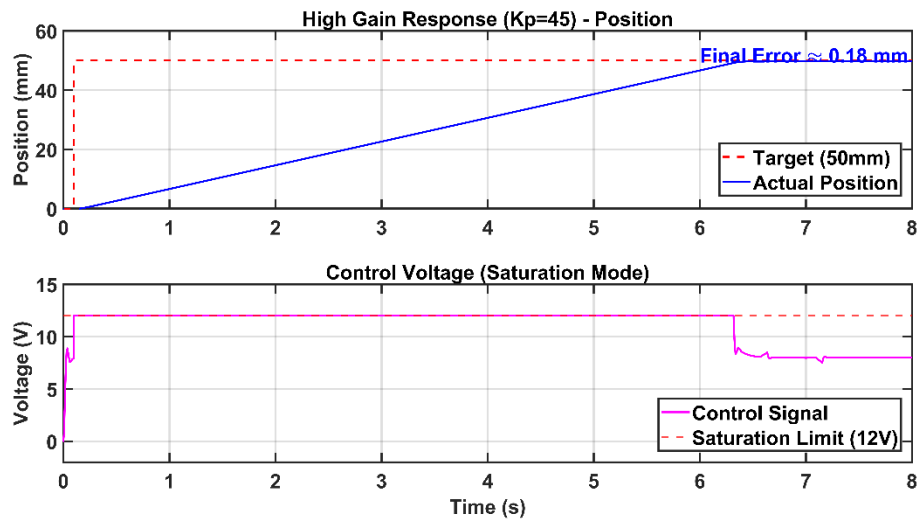


Рис. 7. Динамика системы с высоким коэффициентом усиления ($K_p = 45$) под нагрузкой.
(Сверху: позиция; снизу: управляющее напряжение)

Частотный анализ устойчивости. Для оценки динамических свойств синтезированной системы проведен частотный анализ. На рисунке 8 представлены логарифмические амплитудная

(верхний график) и фазовая (нижний график) частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ) замкнутого контура управления.

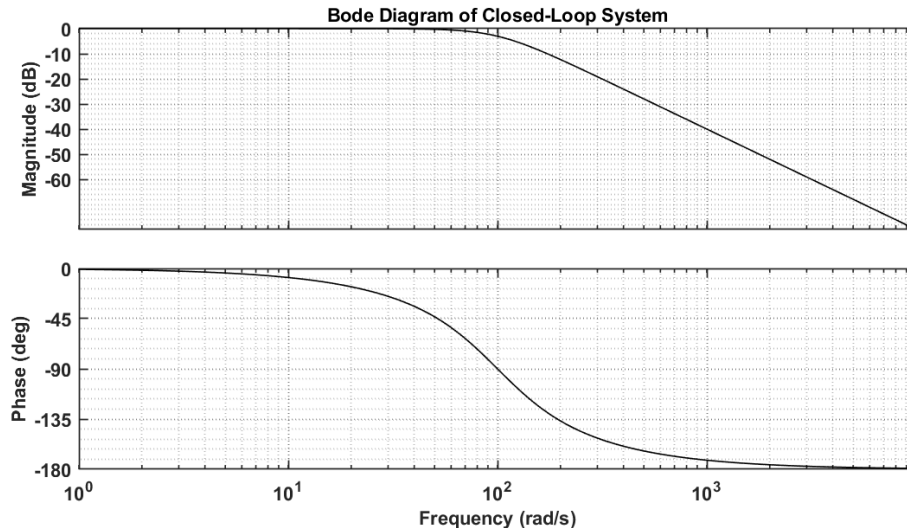


Рис. 8. Логарифмические частотные характеристики (диаграмма Бode) замкнутой системы реконфигурации

Из графиков видно, что полоса пропускания системы (частота, при которой амплитуда падает на -3 дБ) составляет порядка 60 рад/с (≈ 10 Гц). Это подтверждает, что привод способен своевременно обрабатывать команды реконфигурации без существенных задержек.

Фазовая характеристика в рабочем диапазоне частот не пересекает критическую отметку -

180°. Запас по фазе составляет более 45°, что гарантирует абсолютную устойчивость системы даже при наличии нелинейностей и вариации параметров нагрузки. Отсутствие резонансных пиков на ЛАЧХ свидетельствует об аperiodическом характере переходных процессов без перерегулирования.

Полоса пропускания системы составляет $\omega_b \approx 60$ рад/с (около 10 Гц), что обеспечивает

достаточное быстроедействие для задач реконфигурации.

Выводы.

1. Разработана архитектура системы управления, которая, в отличие от аналогов, использует иерархическую структуру с разделением на каналы реконфигурации и движения. Это упрощает масштабирование системы.

2. Предложен метод активного сканирования «Stop-and-Scan», который устраняет главный недостаток ультразвуковых сенсоров – диетного анализа при вертикальном перемещении датчика позволило снизить погрешность измерения высоты препятствий до 1,5 %.

3. Обоснована стратегия управления с насыщением. Доказано, что для электроприводов, характеризующихся существенными нелинейностями (высоким сухим трением, зоной нечувствительности), классические линейные законы управления неэффективны. Введение высокого коэффициента усиления в сочетании с ограничением сигнала позволило уменьшить ошибку позиционирования с 8 мм до 0,2 мм, что обеспечивает надежное геометрическое замыкание механизмов робота независимо от класса используемых приводов.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Li Lei, Ye Tao, Tan Min. Research Status and Future of Mobile Robot Technology // Robot. 2002. Vol. 24, No. 5. Pp. 475–480.
- Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable Autonomous Wheel-Tracked Robot // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE, 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742999.
- Cheah W., Lee T., Kim J., Li X., Chan S. MIRRAX: A Reconfigurable Robot for Limited Access Environments // IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, No. 5. Pp. 2942–2954. DOI: 10.1109/TRO.2021.3130455.
- Wang Y., Liu Z., Zhang H., Zhao J., Li Z., Zhang X. A Reconfigurable Wheel-Tracked Mobile Robot: Mechanism Design and Terrain Traversability Analysis // Autonomous Robots. 2024. Vol. 48. Pp. 112–125. DOI: 10.1007/s10514-023-10145-z.
- Kim J., Han K., Cho S., Lee S., Park J. Stair-Climbing Wheeled Robot Based on Rotating Locomotion of Curved-Spoke Legs // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 11. 4505 p. DOI: 10.3390/app14114505.
- Iagnemma K., Dubowsky S. Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain // The International Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23. Pp. 1029–1040. DOI: 10.1177/0278364904047610.
- Hirose S., Fukushima E.F. Design of Terrain Adaptive Versatile Crawler Vehicle Helios-VI // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 3. Pp. 1540–1545. DOI: 10.1109/IROS.2001.977202.
- Ben-Tzvi P., Givon L., Tzukrel D., Shomron A., Levanon A. Autonomous Alignment and Docking Control for a Self-Reconfigurable Modular Mobile Robotic System // Actuators. 2024. Vol. 13, No. 5. Art. 81. DOI: 10.3390/act13050181.
- Borenstein J., Koren Y. Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995. Vol. 11, No. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.1109/70.345941.
- Yuan Z., Li Z., Liu Z., Zhang Y., Wu J., Wang L. Obstacle Avoidance of Multi-Sensor Intelligent Robot Based on Road Sign Detection // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6777. DOI: 10.3390/s21206777.
- Almakhles D. Mobile Robot Obstacle Detection and Avoidance with NAV-YOLO // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2024. Vol. 13, No. 2. Pp. 219–225. DOI: 10.18178/ijmerr.13.2.219-225.
- Khalil H.K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 750 p. ISBN: 0-13-067389-7.
- Spong M.W., Hutchinson S. Robot Modeling and Control. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. 407 p.
- Rotondo D., Cacace J., Del Prete D., Salatino A., Rota M., Mancuso S. Real-Time Nonlinear Control Allocation Framework for Vehicles with Highly Nonlinear Effectors Subject to Saturation // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2023. Vol. 108. Art. 67. DOI: 10.1007/s10846-023-01860-2.
- Zhang X., Li M., Liu Y., Sun W., Chen Z. Nonlinear Adaptive Optimal Control Design and Implementation for Trajectory Tracking of Mobile Robots // Mathematics. 2024. Vol. 12, No. 24. 4013 p. DOI: 10.3390/math12244013.
- Kuc R. A Spatial Sampling Criterion for Sonar Obstacle Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12, No. 7. Pp. 686–690. DOI: 10.1109/34.56209.
- Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
- Рыбак Л.А., Малышев Д.И., Гапоненко Е.В., Перевузник В.С., Волошкин А.А. Имитационная модель системы управления динамической платформой подвижности на базе гексапода для

тренажерных комплексов // Вестник НИЯУ МИФИ. 2022. Т. 11, № 5. С. 358–365. DOI: 10.26583/vestnik.2022.7.

Информация об авторах

Цюе У. Аспирант кафедры «Автоматики и управления». E-mail: gg1253366@gmail.com. Московский политехнический университет. Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38.

Рачков Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматики и управления». E-mail: michuor@gmail.com. Московский политехнический университет. Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38.

Гапоненко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.01.2026 г.

© Цюе У., Рачков М.Ю., Гапоненко Е.В., 2026

¹Que Wu, ¹Rachkov M.Yu., ²Gaponenko E.V.

¹Moscow Polytechnic University

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: gaponenkobel@gmail.com

CONTROL OF ROBOT RECONFIGURATION USING ACTIVE SCANNING METHOD AND SATURATION STRATEGY

Abstract. The object of this study is a mobile reconfigurable robot with a hybrid wheel-track locomotion system capable of transforming the kinematic structure of its chassis to overcome high vertical obstacles. The relevance of this work is driven by the need to ensure the reliable operation of transformation mechanisms while using low-cost components. This paper addresses the problem of synthesizing a control system that is robust to hardware limitations (dead zones, backlash) and actuator nonlinearities. A novel active vertical scanning method ("Stop-and-Scan") is proposed, which allows for compensating for the physical limitations of standard ultrasonic sensors, such as wide beam width and specular reflection. The method is based on analyzing the distance gradient during the vertical displacement of the sensor, ensuring the accurate determination of obstacle geometric parameters. Particular attention is paid to the control of linear actuators with worm drives, which are characterized by significant dry friction. A control law using high gains in saturation mode has been synthesized, allowing for the compensation of the actuator dead zone without compromising stability. The results of mathematical modeling and field tests confirm that the proposed approach minimizes steady-state positioning error and improves the overall trafficability of the robot.

Keywords: hybrid kinematics, reconfigurable robot, active scanning, ultrasonic localization, saturation control, obstacle negotiation, Arduino Mega.

REFERENCES

1. Li Lei, Ye Tao, Tan Min. Research Status and Future of Mobile Robot Technology. Robot. 2002. Vol. 24, No. 5. Pp. 475–480.
2. Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable Autonomous Wheel-Track Robot. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi: IEEE, 2019. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742999.
3. Cheah W., Lee T., Kim J., Li X., Chan S. MIRAX: A Reconfigurable Robot for Limited Access Environments. IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38, No. 5. Pp. 2942–2954. DOI: 10.1109/TRO.2021.3130455.
4. Wang Y., Liu Z., Zhang H., Zhao J., Li Z., Zhang X. A Reconfigurable Wheel-Track Mobile Robot: Mechanism Design and Terrain Traversability Analysis. Autonomous Robots. 2024. Vol. 48. Pp. 112–125. DOI: 10.1007/s10514-023-10145-z.
5. Kim J., Han K., Cho S., Lee S., Park J. Stair-Climbing Wheeled Robot Based on Rotating Locomotion of Curved-Spoke Legs. Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 11. 4505 p. DOI: 10.3390/app14114505.
6. Iagnemma K., Dubowsky S. Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles in Rough Terrain. The International Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23. Pp. 1029–1040. DOI: 10.1177/0278364904047610.

7. Hirose S., Fukushima E.F. Design of Terrain Adaptive Versatile Crawler Vehicle Helios-VI. Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol. 3. Pp. 1540–1545. DOI: 10.1109/IROS.2001.977202.
8. Ben-Tzvi P., Givon L., Tzukrel D., Shomron A., Levanon A. Autonomous Alignment and Docking Control for a Self-Reconfigurable Modular Mobile Robotic System. Actuators. 2024. Vol. 13, No. 5. Art. 81. DOI: 10.3390/act13050181.
9. Borenstein J., Koren Y. Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robot Obstacle Avoidance. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1995. Vol. 11, No. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.1109/70.345941.
10. Yuan Z., Li Z., Liu Z., Zhang Y., Wu J., Wang L. Obstacle Avoidance of Multi-Sensor Intelligent Robot Based on Road Sign Detection. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20. Art. 6777. DOI: 10.3390/s21206777.
11. Almakhles D. Mobile Robot Obstacle Detection and Avoidance with NAV-YOLO. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2024. Vol. 13, No. 2. Pp. 219–225. DOI: 10.18178/ijmerr.13.2.219-225.
12. Khalil H.K. Nonlinear Systems. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 750 p. ISBN: 0-13-067389-7.
13. Spong M.W., Hutchinson S. Robot Modeling and Control. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. 407 p.
14. Rotondo D., Cacace J., Del Prete D., Salatino A., Rota M., Mancuso S. Real-Time Nonlinear Control Allocation Framework for Vehicles with Highly Nonlinear Effectors Subject to Saturation. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2023. Vol. 108. Art. 67. DOI: 10.1007/s10846-023-01860-2.
15. Zhang X., Li M., Liu Y., Sun W., Chen Z. Nonlinear Adaptive Optimal Control Design and Implementation for Trajectory Tracking of Mobile Robots. Mathematics. 2024. Vol. 12, No. 24. 4013 p. DOI: 10.3390/math12244013.
16. Kuc R. A Spatial Sampling Criterion for Sonar Obstacle Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. Vol. 12, No. 7. Pp. 686–690. DOI: 10.1109/34.56209.
17. Poduraev Yu.V. Mechatronics: Fundamentals, Methods, Application. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 256 p. (rus)
18. Rybak L.A., Malyshev D.I., Gaponenko E.V., Perevuznik V.S., Voloshkin A.A. Optimization of PID Controller Parameters for the Control System of a Hexapod-Based Dynamic Motion Platform for Training Simulators. Bulletin of the National Research Nuclear University “MEPhI”. 2022. Vol. 11, No. 3. Pp. 254–259. DOI: 10.26583/vestnik.2022.7. (rus)

Information about the authors

Wu Que. Postgraduate student. E-mail: gg1253366@gmail.com. Moscow Polytechnic University. Russia, 107023, Moscow Bolshaya Semyonovskaya str., 38.

Rachkov, Michael Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control. E-mail: michyur@gmail.com. Moscow Polytechnic University. Russia, 107023, Moscow Bolshaya Semyonovskaya str., 38.

Gaponenko, Elena V. PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering. E-mail: gaponenkobel@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 28.01.2026

Для цитирования:

Цюе У., Рачков М.Ю., Гапоненко Е.В. Управление реконфигурацией робота методом активного сканирования и стратегией насыщения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124

For citation:

Wu Que, Rachkov M.Yu., Gaponenko E.V. Control of robot reconfiguration using active scanning method and saturation strategy. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-115-124

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-125-133

^{1,*}Гринёк А.В., ¹Фищенко А.М., ¹Бойчук И.П., ²Башкатов В.А., ³Перелыгин Д.Н.¹ООО «Сигматек»²Северная морская компания LTD³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: grinyokann@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНОСА ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ СУДОВОГО ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В статье показаны результаты применения нейронной сети для аппроксимации данных экспериментальных исследований износа керамометаллического покрытия поршневых колец судовых двигателей. Предложена структурная схема, качественно описывающая неоднозначный характер связи износа с набором эксплуатационных параметров. Проведены измерения покрытия поршневых колец действующих судовых двигателей 6S50ME-C-GI с электронным управлением. Установлено, что от состояния поршневых колец судового главного двигателя зависит ряд параметров, определяющих условия функционирования и надежность работы двигателя в целом. Проведен факторный анализ влияния конструктивных и технологических параметров на износ поршневых колец. В качестве основных факторов, влияющих на износ, выбраны удельный расход цилиндрического масла и мощность двигателя. Для обработки накопленных данных использовалась нейронная сеть. С учетом размера обучающих данных показана структура сети, описывающая функционально связь расхода топлива и мощности двигателя с износом, определены массивы данных для её работы и проведено обучение сети. В результате работы нейронной сети получена аппроксимирующая поверхность износа колец и комбинации значащих параметров, при котором износ максимален. Полученные результаты могут быть применены на практике для выработки алгоритма, прогнозирующего календарную дату капитального ремонта цилиндра с учетом факторов износа.

Ключевые слова: поршневые кольца, износ, нейросети, диагностика, обслуживание цилиндропоршневой группы.

Введение. В процессе эксплуатации судовых двигателей внутреннего сгорания необходимо точно контролировать износ поршневых колец. Важность этого подчёркивается тем, что несвоевременная и не запланированная замена поршневых колец приводит к простаиванию судна и соответственно огромным потерям для судовладельца [1]. Поэтому необходимо проводить обслуживание только в запланированный период и только при действительной необходимости.

Контроль состояния колец выполняется, в основном, путём замера толщины кольца в четырёх точках по периметру с шагом 90° и определении их остаточной деформации. Для этих целей необходимо иметь доступ внутрь цилиндра, что является сложной задачей с учетом размеров современных судовых главных дизелей. К тому же на это необходимо отводить время, в течение которое судно будет простаивать.

Для оптимизации контроля поршневых колец разрабатываются и исследуются различные методы безразборного контроля состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ). В работе [1] проводили измерения толщины покрытия поршневых колец ряда двигателей и составили статистическую базу по изменениям этого покрытия. Эта база данных была применена для разработки

математической модели износа поршневых колец. Так же авторами проведены исследования влияния различных факторов эксплуатации на износ поршневых колец. В работе [2] разработали математическую модель для исследования параметров, влияющих на работу и износ ЦПГ.

В патенте [3] предлагается контролировать износ колец визуально, через продувочные и выпускные окна, по количеству заранее нанесённых на кольца лунки. В патенте [4] предлагается использование вибрационного контроля для определения износа колец. Степень износа ЦПГ можно контролировать по содержанию железа в картерном масле и выпускных газах. На этом базируются исследования в работах [5–8]. В статье [9] используются вероятностные методы оценки износа ЦПГ. Основываясь на средних показателях износа конкретного двигателя, предлагается судить о текущем состоянии ЦПГ по различию температур блока цилиндров [10]. Состояние поршневых колец и их износ в процессе эксплуатации так же исследуется в работах [11–15].

Керамометаллическое покрытие является частью износа поршневых колец и может быть использовано как один из факторов, определяющий необходимость проведения капитального ремонта цилиндра по достижению пороговых

значений, согласно рекомендации производителя. Кроме прочего, математическое моделирование износа колец в рамках иерархических моделей пропульсивных систем [16] может повысить качество моделирования сложных систем.

Целью работы является создание математической модели на основе эмпирических данных, связывающей параметры эксплуатации и износ колец дизельного двигателя. Предложенный подход с использованием модели в виде ИНС (Искусственная Нейронная Сеть) обеспечит потенциал расширения и дополнения модели новыми данными и параметрами.

Материалы и методы. Были проведены наблюдения по износу поршневых колец. Замеры проводились с помощью толщинометра Elcometer 456. По результатам измерений по рекомендуемой производителем двигателей методике произведена оценка зависимости износа керамометаллического покрытия колец в зависимости от эксплуатационных параметров.

Факторы, которые влияют на износ поршневых колец, можно разделить на три группы:

- Внешние факторы, они определяют условия в камере сгорания, формируют атмосферу, в которой происходят рабочие процессы. Влияние на атмосферу оказывают следующие факторы:

содержание серы в топливе, температура наддува, влажность воздуха.

- Внутренние факторы: температура в точке касания пар трения и сила трения.

- Поверхностные факторы, которые определяются количеством смазки внутри цилиндра.

Рассмотрев природу названных факторов более подробно, можно, условно, присвоить каждому из факторов знак «+» или «-», в зависимости от влияния этих факторов на износ поршневых колец.

На рис. 1 приведена общая структурная модель износа поршневых колец, на которой показана качественная связь износа со многими параметрами:

N_e – средняя эффективная мощность за период, кВт;

T – средняя температура наддува за период, °C;

n – частота оборотов двигателя;

V_n – скорость движения поршня;

φ – средняя относительная влажность за период, %;

S – массовое содержание серы в топливе, %;

q_m – удельный расход цилиндрического масла, г/кВтч.

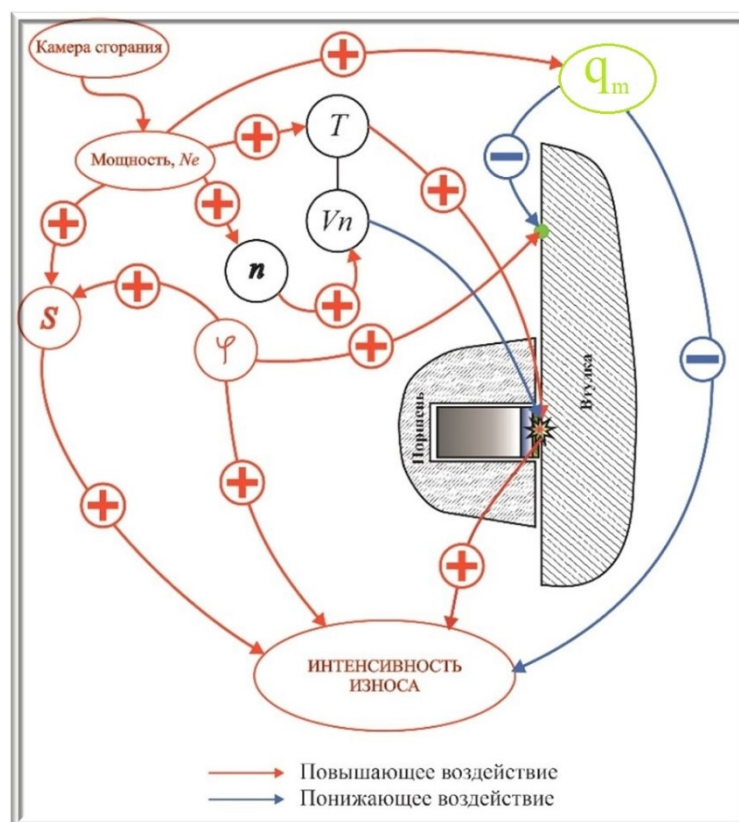


Рис. 1. Комплексная модель износа поршневых колец (обозначения приведены выше)

Сложность такой модели заключается в том, что взаимное влияние факторов может носить неоднозначный характер.

Соответственно износ покрытия поршневых колец будет определяться как сумма функций износа от рассмотренных факторов:

$$\sum \sigma = f(N_e) + f(\varphi_{отн}) + f(T) + f(S) + f(q_m) \quad (1)$$

Основная часть. Замеры остаточного покрытия поршневых колец проводились в пределах от 421 до 827 часов наработки. Частота замеров зависела от рейсового задания судна. Относительная ошибка замеров составила 0,26 %, при систематической ошибке измерительного прибора $\pm 1,5$ %. При определении остаточной толщины покрытия поршневых колец была принята

ошибка измерения $\pm 1,5$ %. При анализе износа поршневых колец на установившемся режиме двигателя в течение длительного времени были получены значения распределения износа по составляющим. Гистограмма распределения влияния факторов износа представлена на рис. 2.

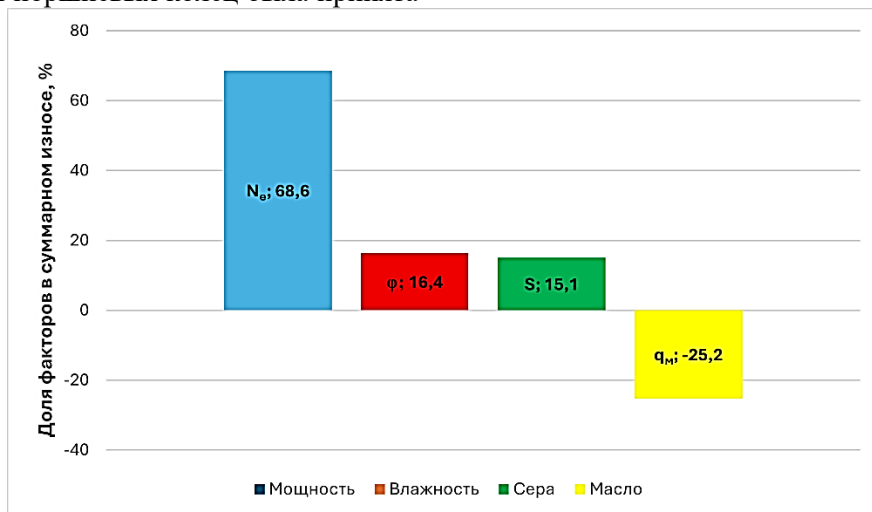


Рис.2. Гистограмма распределения влияния факторов износа

В процессе исследования были накоплены данные, характеризующие факторы и степень износа поршневых колец и рабочих параметров цилиндропоршневой группы. Для обработки имеющихся данных предлагается использовать нейронную сеть [17], которая по входным признакам будет определять степень износа поршневых колец.

Для решения поставленной задачи аппроксимации интенсивности износа будет достаточно возможностей простой сети с прямым распространением [18–20].

Нейронная сеть для аппроксимации данных об износе создана с использованием пакета Neural Networks Toolbox Matlab. Построена сеть, состоящая из входного слоя, скрытого слоя и выходного слоя. В качестве аппроксимирующей сети выбрана двухслойная сеть прямого распространения. Скрытый слой состоит из 40 нейронов с передаточной функцией тангенциальной сигмиды:

$$f(x) = \text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

На рис. 3 представлена схема построения нейронной сети в среде MATLAB. Цифрами под блоками обозначены количество параметров на входе и выходе нейронной сети и количество нейронов для скрытого и выходного слоя. Значение w – это вес нейрона, на который умножается входное значение. А обозначение b является коэффициентом смещения.

Оптимальное количество слоёв и нейронов в слоях подбиралось на основании результатов обучения нейронной сети. Слишком сложная архитектура нейронной сети, чрезмерно большое количество входных параметров и слишком долгое обучение на одной и той же выборке данных могут привести к переобучению сети и, соответственно, ошибкам в её ответах. Так же для нейронной сети со сложной и большой архитектурой требуется большая выборка обучающих данных. При этом нейронная сеть со слишком малым количеством слоёв или нейронов может быть не эффективной, что зависит от задач выполняемой этой сетью.

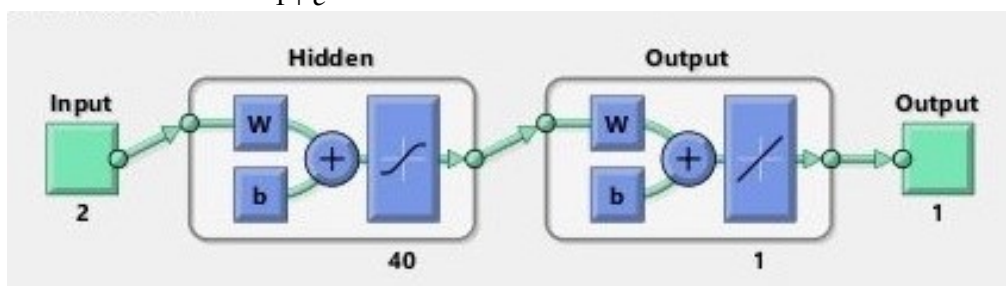


Рис. 3. Структура аппроксимирующей нейронной сети

Основным принципом обучения сети такого вида является обратное распространение ошибки. Функцией производительности по умолчанию для сетей с прямой связью является среднеквадратическая ошибка mse – среднеквадратическая ошибка между выходными данными сети и целевыми выходными данными.

При построении сети входными параметрами для обучения выбраны мощность двигателя и удельный расход цилиндрического масла. Выбор двух параметров определяется возможностью его визуализации построением поверхности аппроксимации.

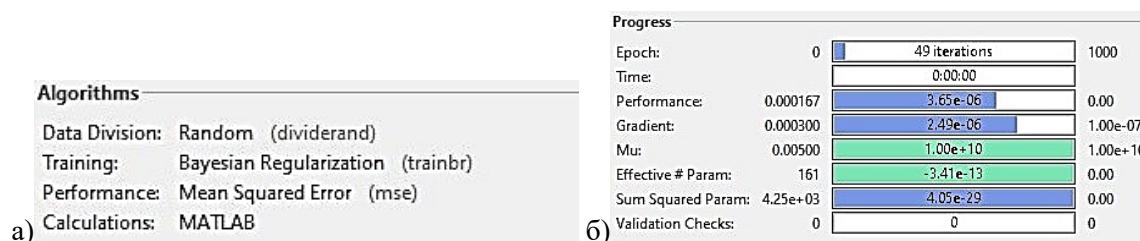


Рис. 4. Настройки нейронной сети: а – алгоритм обучения; б – процесс обучения сети

Как видно из рис. 4б, сеть достигла оптимального результата обучения после 49 циклов итераций.

Обучение сети прекращалось при возникновении любого из условий:

- Достигнуто максимальное количество epochs (повторений).
- Градиент производительности падает ниже $mingrad$.

Важной особенностью для получения хорошего результата работы нейронной сети является подготовка данных, в данном случае нормирование функции. Оптимальным диапазоном для входных данных является диапазон (0;1) или (-1;1). При выборе сигмоиды в качестве функции активации рекомендуют уменьшить интервал до (0,1;0,9). Таким образом, мощность двигателя для входного слоя должна быть масштабирована до этого предела. Наилучшим выходом из положения является выражение мощности в процентах, а точнее в долях единицы. На рис. 4 показаны настройки алгоритма обучения и процесс обучения.

- Шаг обучения μ начинал превышать его максимально допустимое значение $\mu_{max} = 1e10$.

Производительность валидации увеличилась более чем max_fail в разы с момента последнего снижения (при использовании валидации).

На рис. 5 показаны параметры обучения: градиент «gradient», параметр адаптации алгоритма « μ », среднеквадратичное отклонение «ssX», и ошибка проверки «val fail».

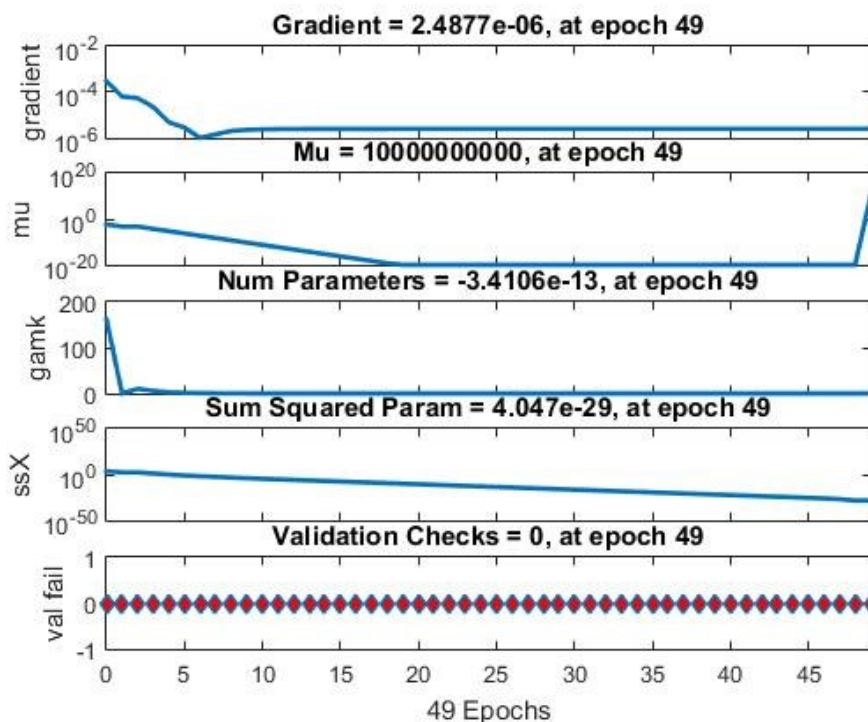


Рис. 5. Параметры обучения

Результаты. В результате обучения получена аппроксимационная зависимость, описывающая связь выбранных факторов с износом. Тестовая выборка показала сходимость обученной сети с данными измерений с отклонением до 9%.

Результаты приведены в таблице 1. В дальнейшем, для уменьшения отклонения, следует использовать большую выборку экспериментальных данных для более эффективного обучения нейронной сети и более двух входных параметров [21].

Таблица 1

Результаты обработки экспериментальных данных нейронной сетью

Мощность двигателя, %	Удельный расход цилиндрического масла, г/кВтч	Интенсивность износа по ИНС, мкм/ч	Фактическая интенсивность износа, мкм/ч	Отклонение, %
54	0,8	0,011023	0,01061	-3,8
54	1,2	0,01105	0,01055	-4,5
82	0,8	0,01495	0,01413	-5,5
82	1,2	0,01015	0,01106	9
55	0,85	0,01087	0,01058	-2,7
55	0,8	0,01113	0,01058	-4,9
56	0,82	0,01105	0,01083	-1,9
56	0,85	0,01077	0,01082	0,5
56	0,86	0,01070	0,01082	1,1
57	0,85	0,01083	0,01107	2,2
57	0,87	0,01064	0,01021	-4,1
58	0,87	0,01070	0,01024	-4,2
58	0,88	0,01059	0,01024	-3,2
58	0,91	0,01033	0,00984	-4,7
59	0,93	0,01015	0,01007	-0,8
61	0,94	0,01007	0,01053	4,5
63	0,96	0,00997	0,01046	4,9
65	0,96	0,01027	0,01070	4,2
66	0,97	0,01026	0,01076	4,9
66	1	0,00978	0,00999	2,1
67	1,01	0,00980	0,01020	4,1
69	1,03	0,00986	0,01002	1,6
69	1,06	0,00978	0,01000	2,3
73	1,08	0,01008	0,01085	7,6
74	1,09	0,01013	0,01037	2,3
75	1,12	0,01032	0,01055	2,2
76	1,15	0,01059	0,01073	1,3
77	1,16	0,01059	0,01092	3,2
77	1,2	0,01123	0,01204	7,2
80	1,2	0,01060	0,01086	2,5

На рис. 6 представлена аппроксимирующая поверхность, построенная нейронной сетью и описывающая связь интенсивности износа с мощностью и удельным расходом цилиндрического масла. По оси абсцисс и ординат – мощность и удельный расход масла, по оси аппликат – интенсивность износа керамометаллического покрытия. Из поверхности видно, что существуют комбинации экстремальных значения мощности, при которых износ максимален. На максимальной мощности при малом расходе топлива износ колец снижается. Данная информация должна быть включена в эксплуатационные документы.

Выводы. В работе получены зависимости, определяющие связь интенсивности износа поршневых колец исследуемого двигателя с режимами работы двигателя. Это позволяет повысить эффективность и оптимизировать проведение обслуживания ЦПГ.

Определен неоднозначный характер влияния факторов на износ. Полученные результаты могут быть применены на практике для разработки алгоритма, прогнозирующего календарную дату капитального ремонта цилиндра с учетом факторов износа.

Полученная при помощи нейронной сети аппроксимирующая зависимость с увеличением набора данных измерений и наблюдений может

быть расширена путем ввода новых параметров, таких как влажность и температура.

Кроме того, в совокупности с численными структурными иерархическими моделями технологических процессов нейронные модели могут

использоваться при создании цифровых двойников судна.

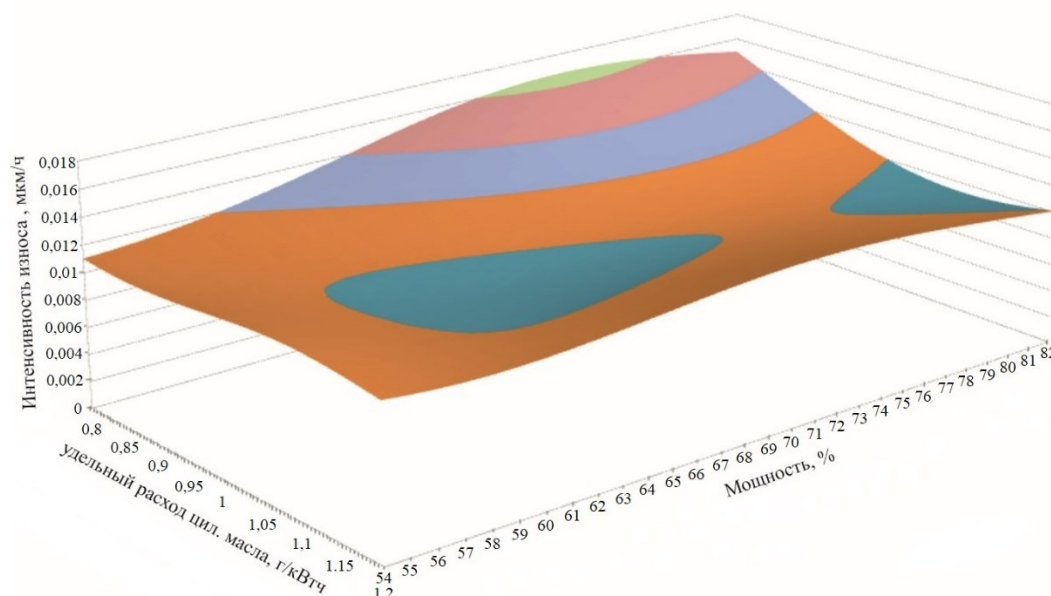


Рис. 6. Визуализация аппроксимирующей поверхности интенсивности износа, построенная нейронной сетью

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kaminski W., Michalska-Pozoga I. Possibility of Marine Low-Speed Engine Piston Ring Wear Prediction during Real Operational Conditions // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 3. 1433. DOI: 10.3390/en16031433.

2. Tuninetti V., Menacer B., Narayan S. Theoretical analysis of the piston ring pack for predicting friction and power loss in an internal Combustion Engine // *Structural Integrity and Life*. 2024. Vol. 24. No. 2. Pp. 193–198. DOI: 10.69644/ivk-2024-02-0193.

3. Авт. свид. № 1770817 СССР, МПК G01N 3/56. Способ измерения величины износа поршневых колец судового двигателя/ Карпов Л. И., Бурьянов В. Н.; заявитель Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота. №4852137/28; заявл. 11.07.1990; опубл. 23.10.1992. 3 с.

4. Пат. 009611051, Российская Федерация, МПК G01M 15/00 (1995.01). Способ определения степени изношенности элементов цилиндропоршневой группы судового дизеля/ Котешов А. А.; заявитель Котешов А. А. № 96110151/06; заявл. 21.05.1996; опубл. 20.08.1998. 1 с.

5. Нечаев Е.П. Безразборный контроль интенсивности изнашивания деталей цилиндропоршневой группы дизелей // *Вестник МГТУ*. 2013. № 4 (16). С. 771–776.

6. Овчаренко С.М., Минаков В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей изнашивания деталей дизеля типа Д49 // *Известия Транссиба*. 2013. № 3 (15). С. 55–61.

7. Сагин С.В. Оптимизация расхода высокощелочного цилиндрического масла судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки: электронный научный журнал*. 2016. № 7 (28). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3385> (дата обращения: 23.12.2025).

8. Овчаренко С.М. Распознавание катастрофического изнашивания деталей дизеля на основе модели нейронной сети // *Омский научный вестник*. 2006. № 10 (48). С. 49–51.

9. Дзюбин Д.В., Иванов В.И. Методы оценки износа пары цилиндр-поршневое кольцо в двигателях внутреннего сгорания транспортных и технологических машин // *Омский научный вестник*. 2009. №3 (83). С. 114–117.

10. Erulan G., Saleem M., Chandan S., Nema A. Thermal and Static analysis of Engine Piston rings. // *International Journal of Ambient Energy*. 2019. Vol. 1. No. 43. Pp. 300–304. DOI: 10.1080/01430750.2019.1636875.

11. Bouzana A., Guermat A., Belarifi F. Experimental Results of a Hydrodynamic Friction Behaviour of a Linear Contact at Low Sliding Velocity // *International Conference on Tribology (BalkanTRib'17At: Cappadocia/TURKEY)*. 2017. 1177.

12.Ferreira, R., Carvalho Ó., Pires J., Sobral L., Carvalho S., Silva F. A New Tribometer for the Automotive Industry: Development and Experimental Validation // *Experimental Mechanics*. 2022. Vol. 62. Pp. 483–492. DOI: 10.1007/s11340-021-00805-7.

13.Ferreira R., Martins J., Carvalho O., Sobral L., Carvalho S., Silva F. Tribological solutions for engine piston ring surfaces: an overview on the materials and manufacturing // *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 5(35). Pp. 1–23. DOI: 10.1080/10426914.2019.1692352.

14.Khachkinayan A., Zharkov Yu., Zubkov V., Novakovich V., Ermakov V. Investigation of piston ring wear engines by the mathematical statistics method // *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2 (2131). 022038. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022038.

15.Wakuri Y., Kitahara T., Hamatake T., Soejima M. Characteristics of Piston Ring Friction Influences of Piston Ring Specifications. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part C*. 1996. Vol. 62(599). Pp. 2811–2817.

16.Гринек А.В., Бойчук И.П., Фищенко А.М., Алексянц С.Ю., Слепов О.Е., Чирков Е.Н. Объектно-ориентированное моделирование су-

довых пропульсивных систем // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2025. № 1. С. 88–99. DOI:10.24143/2073-1574-2025-1-88-99. EDN ZPIOPM.

17.Покусаев М.Н., Касимов Н.Н. Система диагностики судовых энергетических установок с применением нейросетевых моделей // *Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2012. № 2. С. 88–93

18.Huang S., Zhang H.C. Neural networks in manufacturing: A survey // *Electronic Manufacturing Technology Symposium Fifteenth IEEE/CHMT International*. 1993. Pp. 177–190.

19. Современное машиностроение: наука и образование 2025, под редакцией: А.Н. Евграфова, А. А. Поповича. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2025. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i25-199.

20.Simonova L.A., Egorova E.I., Akhmadiev A.I. Neural Networks in Manufacturing // *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. Pp. 278–281. DOI: 10.3103/S1068798X22030224.

21.Bashkatov V., Khudyakov S., Ignatenko A. Gas fuel combustion and related problems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2061. Pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012059.

Информация об авторах

Гринек Анна Владимировна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: grinyokann@gmail.com. ООО «Сигматек». Россия, 191119, город Санкт-Петербург, Днепропетровская ул, д. 33 литера А, помещ. 10(4н).

Фищенко Артем Михайлович, инженер. E-mail: fishenko2012@gmail.com. ООО «Сигматек». Россия, 191119, город Санкт-Петербург, Днепропетровская ул, д. 33 литера А, помещ. 10(4н).

Бойчук Игорь Петрович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: igor_boichuk@mail.ru. ООО «Сигматек». Россия, 191119, город Санкт-Петербург, Днепропетровская ул, д. 33 литера А, помещ. 10(4н).

Башкатов Владимир Александрович, старший механик. E-mail: Bashkatov_vladimir@inbox.ru. Северная морская компания LTD, Глазго, G81 2QR, Шотландия, Великобритания.

Перелыгин Дмитрий Николаевич, старший преподаватель. E-mail: mehanikus@mail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, БГТУ им. В. Г. Шухова.

Поступила 19.12.2025 г.

© Гринёк А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Башкатов В.А., Перелыгин Д.Н., 2026

^{1,*}Grinek A.V., ¹Fishenko A.M., ¹Boychuk I.P., ²Bashkatov V.A., ³Perelygin D.N.

¹Sigmatek LLC

²Northern Marine Company LTD

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

PREDICTION OF PISTON RING WEAR IN MARINE MAIN ENGINE USING NEURAL NETWORKS

Abstract. The article shows the results of using a neural network to approximate the data of experimental studies of the wear of the ceramic-metal coating of the piston rings of ship engines. A structural diagram is proposed that qualitatively describes the ambiguous nature of the relationship between wear and a set of

operational parameters. The coating of piston rings of operating ship engines 6S50ME-C-GI with electronic control was measured. The condition of the piston rings of the marine main engine determines a number of parameters that determine the operating conditions and reliability of the engine. Factor analysis of the effect of structural and technological parameters on the wear of piston rings was carried out. The specific consumption of cylinder oil and engine power are selected as the main factors affecting wear. A neural network was used to process the accumulated data. Taking into account the size of the training data, the network structure is shown, which describes the functional relationship between fuel consumption and engine power with wear, data arrays for its operation are determined and the network is trained. As a result of the operation of the neural network, an approximating surface of wear of rings and a combination of significant parameters is obtained, at which wear is maximum. The obtained results can be applied in practice to develop an algorithm that predicts the calendar date of overhaul of the cylinder, taking into account wear factors.

Keywords: piston rings, wear, neural networks, diagnostics, maintenance of the cylinder piston group.

REFERENCES

1. Kaminski W., Michalska-Pozoga I. Possibility of Marine Low-Speed Engine Piston Ring Wear Prediction during Real Operational Conditions. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 3. 1433. DOI: 10.3390/en16031433.
2. Tuninetti V., Menacer B., Narayan S. Theoretical analysis of the piston ring pack for predicting friction and power loss in an internal Combustion Engine. *Structural Integrity and Life*. 2024. Vol. 24. No. 2. Pp. 193–198. DOI: 10.69644/ivk-2024-02-0193.
3. Karpov LI., Buryanov V.N. Method for measuring the wear value of piston rings of a marine engine. Patent RF, no. 4852137/28, 1992.
4. Koteshev A.A. Method for determining the degree of wear of elements of the cylinder-piston group of a marine diesel engine. Patent RF, no. 009611051, 1998.
5. Nechayev E.P. In-place monitoring of wear intensity of parts of the cylinder-piston group of diesel engines [Bezrazborny'j kontrol' intensivnosti iznashivaniya detalej cilindroporshnevoj gruppy' dizelej]. *Bulletin of Moscow State Technical University*. 2013, Vol.4. No. 4. Pp.771-776
6. Ovcharenko, S. M. Theoretical and experimental study of wear patterns of diesel engine parts type D49 [Teoreticheskoe i e'ksperimental'noe issledovanie zakonornostej iznashivaniya detalej dizelya tipa D49]. *Transsib News*. 2013. Vol. 15. No. 3. Pp. 55-61.
7. Sagin, S. V. Optimization of consumption of highly alkaline cylinder oil of marine low-speed diesel engines [Optimizaciya rasxoda vy'sokoshhelochnogo cilindrovogo masla sudovy'x maloo-borotny'x dizelej] *Universum: Technical sciences: electronic scientific journal*. 2016. Vol. 28. No.7. URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3385>
8. Ovcharenko, S. M. Recognition of catastrophic wear of diesel engine parts based on a neural network model [Raspoznavanie katastroficheskogo iznashivaniya detalej dizelya na osnove modeli nejronnoj seti] *Omsk Scientific Bulletin*. 2006. Vol. 48. No.10. Pp. 49-51.
9. Dzyubin, D. V. Methods for assessing the wear of a cylinder-piston ring pair in internal combustion engines of transport and technological machines [Metody' ocenki iznosa pary' cilindroporshnevoe kol'cho v dvigatelyax vnutrennego sgoraniya transportny'x i texnologicheskix mashin]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2009. Vol.83. No.3. Pp. 114–117.
10. Erulan G., Saleem M., Chandan S., Nema A. Thermal and Static analysis of Engine Piston rings. *International Journal of Ambient Energy*. 2019. Vol. 1. No. 43. Pp. 300–304. DOI: 10.1080/01430750.2019.1636875.
11. Bouzana A., Guermat A., Belarifi F. Experimental Results of a Hydrodynamic Friction Behaviour of a Linear Contact at Low Sliding Velocity. *International Conference on Tribology (BalkanTRIB'17At: Cappadocia/TURKEY)*. 2017. 1177.
12. Ferreira, R., Carvalho Ó., Pires J., Sobral L., Carvalho S., Silva F. A New Tribometer for the Automotive Industry: Development and Experimental Validation. *Experimental Mechanics*. 2022. Vol. 62. Pp. 483–492. DOI: 10.1007/s11340-021-00805-7.
13. Ferreira R., Martins J., Carvalho O., Sobral L., Carvalho S., Silva F. Tribological solutions for engine piston ring surfaces: an overview on the materials and manufacturing. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 5(35). Pp. 1–23. DOI: 10.1080/10426914.2019.1692352.
14. Khachkinayan A., Zharkov Yu., Zubkov V., Novakovich V., Ermakov V. Investigation of piston ring wear engines by the mathematical statistics method. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2 (2131). 022038. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022038.
15. Wakuri Y., Kitahara T., Hamatake T., Soejima M. Characteristics of Piston Ring Friction Influences of Piston Ring Specifications. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Part C*. 1996. Vol. 62. No. 599. Pp. 2811–2817.
16. Grinek A. V., Boychuk I. P., Fishchenko A. M., Aleksyants S. Yu., Slepov O. E., Chirkov E. N. Object-oriented modeling of ship propulsion systems

[Ob`ektно-orientirovannoe modelirovanie sudovy`x propul'sivny`x sistem]. Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2025. No. 1. Pp. 88–99. DOI: 10.24143/2073-1574-2025-1-88-99. EDN ZPIOPM.

17. Pokusaev, M. N. Diagnostic system for ship power plants using neural network models [Sistema diagnostiki sudovy`x e`nergeticheskikh ustanovok s primeneniem nejrosetevy`x modelej]. Bulletin of ASTU. Series: Management, computing technology and informatics. 2012. No.2. Pp. 88–93.

18. Huang S., Zhang H.C. Neural networks in manufacturing: A survey. Electronic Manufacturing

Technology Symposium Fifteenth IEEE/CHMT International. 1993. Pp. 177–190.

19. Modern Mechanical Engineering: Science and Education 2025: proceedings of the 14th International Scientific Conference, Russia, June 18, 2025. DOI 10.18720/SPBPU/2/i25-199.

20. Simonova L.A., Egorova E.I., Akhmadiev A.I. Neural Networks in Manufacturing. Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42. Pp. 278–281. DOI: 10.3103/S1068798X22030224.

21. Bashkatov V., Khudyakov S., Ignatenko A. Gas fuel combustion and related problems. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2061. Pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012059.

Information about the authors

Grinek, Anna V., PhD, associate professor. E-mail: grinyokann@gmail.com. Sigmatek LLC. Russia, 191119, Sankt-Peterburg, Dnepropetrovskaya st., 33/A/10(4H).

Fishenko, Artem M., engineer. E-mail: fishenko2012@gmail.com. Sigmatek LLC. Russia, 191119, Sankt-Peterburg, Dnepropetrovskaya st., 33/A/10(4H).

Boychuk, Igor P., PhD, associate professor. E-mail: igor_boichuk@mail.ru. Sigmatek LLC. Russia, 191119, Sankt-Peterburg, Dnepropetrovskaya st., 33/A/10(4H).

Bashkatov, Vladimir A., chief engineer. E-mail: Bashkatov_vladimir@inbox.ru. Northern marine management ltd, Glasgow, G81 2QR, United Kingdom

Perelygin, Dmitrij N., senior lecturer. E-mail: mehanikus@mail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 19.12.2025

Для цитирования:

Гринёк А.В., Фищенко А.М., Бойчук И.П., Башкатов В.А., Перельгин Д.Н. Прогнозирование интенсивности износа поршневых колец судового главного двигателя с использованием нейронных сетей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 5. С. 125–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-125–133

For citation:

Grinek A.V., Fishenko A.M., Boychuk I.P., Bashkatov V.A., Perelygin D.N. Prediction of piston ring wear in marine main engine using neural networks. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 125–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-125-133

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-134-142

¹Пастухов А.Г., ¹Тимашов Е.П., ¹Минасян А.Г., ^{2,*}Волков М.И.¹Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина²Закрытое акционерное общество «Сокол-АТС»

*E-mail: volkov.mikhail2017@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСКОВ СОШНИКОВ ПОСЕВНЫХ МАШИН

Аннотация. Повышение эффективности производства сельскохозяйственной продукции базируется на высоком техническом уровне машин, что обусловлено применением инновационных технологий в сельскохозяйственном машиностроении. В этой связи необходимо обеспечить работоспособность основных рабочих органов посевных машин при возделывании зерновых культур, в частности, для зерновых сеялок – работоспособность двухдисковых сошников. Цель исследований – сравнительная оценка триботехнических свойств серийных и опытных дисков на основе лабораторных испытаний образцов. При проведении исследований составлена программа и разработана методика испытаний в два этапа: на первом – проводили испытания на изнашивание с оценкой по массовому износу с целью сопоставления износостойкости образцов дисков на шлифовально-полировальной машине в комплекте LaboPol-30 и LaboForce-100; на втором – проводили испытания на трение с оценкой по коэффициенту трения скольжения рабочих поверхностей на универсальной машине трения УМТ-200. Результаты испытаний показали, что отношение интенсивности изнашивания серийных и опытных образцов равно 1,3...1,9, а отношение коэффициента трения серийных и опытных образцов – 1,22...2,11. Данные результаты имеют высокую сходимость с результатами сравнительных ускоренных стендовых испытаний серийных и опытных дисков на изнашивание.

Ключевые слова: работоспособность, посевные машины, ресурс, диски сошников, триботехнические свойства, изнашивание, коэффициент трения.

Введение. В Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2017 г. № 1455-р, одной из основных задач является разработка конкурентоспособных отечественных сельскохозяйственных машин и технологий обеспечения их работоспособности. В Стратегии заложено наращивание инновационного потенциала сельскохозяйственного машиностроения за счет активной поддержки проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и выполнения программ технического перевооружения предприятий сельскохозяйственного машиностроения.

С целью реализации и развития передового сельского хозяйства в России и получения стабильного высокого урожая зерновых культур следует повышать работоспособность сельскохозяйственных машин на основе увеличения долговечности и безотказности рабочих органов, непосредственно взаимодействующих с почвой. К таковым относятся рабочие органы почвообрабатывающих, посевных и уборочных машин [1]. С точки зрения закладки урожая, посев является наиболее точной и сложной операцией, в этой связи к двухдисковым сошникам предъявляются высокие требования по работоспособности. Ресурс дисков сошников и работоспособность сея-

лок во многом зависят от технического состояния дисков сошников [2]. При уменьшении внешнего диаметра дисков сошников по причине абразивного изнашивания глубина заделки семян также снижается, что сказывается на полевой всхожести семян и урожайности культуры. Таким образом, требуется обеспечение работоспособности дисков сошников по износостойкости, что характеризуется изменением триботехнических свойств рабочих поверхностей дисков.

Анализ работ в области оценки свойств рабочих поверхностей после упрочнения и восстановления рабочих органов сельскохозяйственных машин показал, что триботехнические испытания на изнашивание и по коэффициенту трения применяются широко. Так, например, Нотов Р.А. и Лебедев А.Т. проводят исследование триботехнических свойств дисков сошников на образцах из стали 65Г о жестко закрепленный абразивный материал при сухом трении, используя шлифовально-полировальный станок FORCIPOL 1V, с целью количественной оценки изнашивания образцов по массе на минимальных режимах нагружения, приближенных к эксплуатации (частота вращения образцов – 120 мин⁻¹, сила давления на образец – 5Н) [3]. Литвинов Т.А. и другие проводят исследования на образцах размером 4×5×10 мм о жестко закрепленный абразив, используя абразивную шкурку 6-Н 14А ГОСТ 13344-79 и

универсальную установку МИ-1М, при постоянной нагрузке $P=400$ г, с последующей оценкой износа проводят по потере массы [4]. Тюрин А.Г. и другие проводят испытания на образцах диаметром 2 мм и высотой 10 мм, о жестко закрепленный абразив ГОСТ 17367-71, используя шкурку с абразивными частицами от 60 до 80 мкм, при частоте вращения 60 об/мин, удельном давлении на образец 1 МПа, пути трения 30 м, радиальном перемещении образца 1,4 мм/об, с последующей оценкой износа по потере массы [5]. Кроха В.А. проводит испытание на образцах диаметром 2 мм и длиной 20 мм на машине трения Х-4 Б по ГОСТ 17367-71 с оценкой износа по потере массы [6]. Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. и другие проводят испытания пар трения между образцами размером $25 \times 80 \times 5$ мм и контробразцами с меньшей поверхностью трения 4×25 мм, при средней скорости относительного скольжения образцов 0,19 м/с, максимальной нагрузке на образцы 1250 Н и времени испытаний 3,5 ч, с оценкой износа по потере массы [7]. Тарасов В.В. и другие проводят испытания на образцах диаметром 5 мм в контакте с шкуркой шлифовальной тканевой водостойкой КК19ХВ различной зернистости на машине трения Х-4 Б при нагрузке 3...12 Н, частоте вращения 750 мин⁻¹, подаче 250 мм/мин с оценкой линейного износа [8].

Цель работы – определение сравнительной износостойкости образцов серийных и опытных дисков.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести испытания на изнашивание и на трение;
- дать сравнительную оценку износостойкости образцов по износу и коэффициенту трения.

Материалы и методы. Объект исследования – серийные (СД) и опытные диски сошников сеялки СЗТ-3,6А (внешний диаметр 350 мм), из которых вырезались лабораторные образцы [9]. Опытные диски подвергались различным ремонтным воздействиям: 1) для серийных дисков диаметром 350 мм проводили электромеханическое упрочнение лезвия дисков (СУД); 2) при износе дисков по диаметру от 350 мм до 340 мм проводили заточку и электромеханическое упрочнение лезвия дисков (ЭУД); 3) при износе дисков по диаметру от 326 мм и менее проводили приварку ремонтной детали (полуколец), заточку и электромеханическое упрочнение лезвия (ВУД) [10]. Программа испытаний включала испытания на сухое трение образцов из серийного и опытных дисков в трехкратной повторности.

Образцы вырезаны из дисков в виде: 1) для испытания на изнашивание – прямоугольник шириной 8 мм и длиной 18 мм; 2) для испытаний на трение – квадрат со стороной 12 мм. Для оценки износа по массе использовали весы ВЛТ-510П с точностью 0,01 г. Исследование включает триботехнические испытания в два этапа на шлифовально-полировальной машине в комплекте LaboPol-30 и LaboForce-100 и на универсальной машине трения УМТ-200.

При испытании на шлифовально-полировальной машине методика испытаний включала приработку и основные испытания образцов. Исходя из возможностей шлифовально-полировальной машины для создания одинаковых условий испытаний, испытываем сразу четыре образца из серийного и опытных дисков, при этом для фиксации образцов приклеиваем их в специальные термопластические оправки, выполненные с центральной канавкой, и устанавливаем их в головной части LaboForce-100 (рис. 1, а). Приработку осуществляем при следующих условиях и режимах: 1) шлифовальная шкурка – Sic Foil #220; 2) нагрузка – максимальная единичная 20 Н; 3) частота вращения диска головной части – 150 мин⁻¹, частота вращения диска основной части – 50 мин⁻¹; 4) направление вращения диска головки и диска основания – одинаковое; 5) время цикла испытаний составляет 5 мин. Значения режимов испытаний показаны на панели управления головной части машины LaboForce-100 (рис. 1, б).

При проведении основных испытаний назначаем следующие условия и режимы: 1) шлифовальная шкурка – Sic Foil #120; 2) нагрузка максимальная единичная – 50 Н; 3) частота вращения диска головной части – 150 мин⁻¹, частоту вращения диска основной части – 500 мин⁻¹; 4) направление вращения диска головки и диска основания – встречное; 5) время одного цикла испытаний – 15 мин, число циклов – 4, общее время испытаний – 60 мин. Значения режимов испытаний показаны на панели управления головной части машины LaboForce-100 (рисунок 1, в).

Оценку износостойкости образцов проводим по снижению их массы с учетом продолжительности испытаний. Условия и режимы испытаний по ГОСТ 17367-71 подобраны так, чтобы нагрев материала образцов не влиял на его свойства, а минимальный абсолютный износ, подлежащий измерению, составлял 5 мг.

Абсолютный износ образцов серийных и опытных дисков вычисляем по формуле

$$\Delta G_i = G_i - G_{i0}, \quad (1)$$

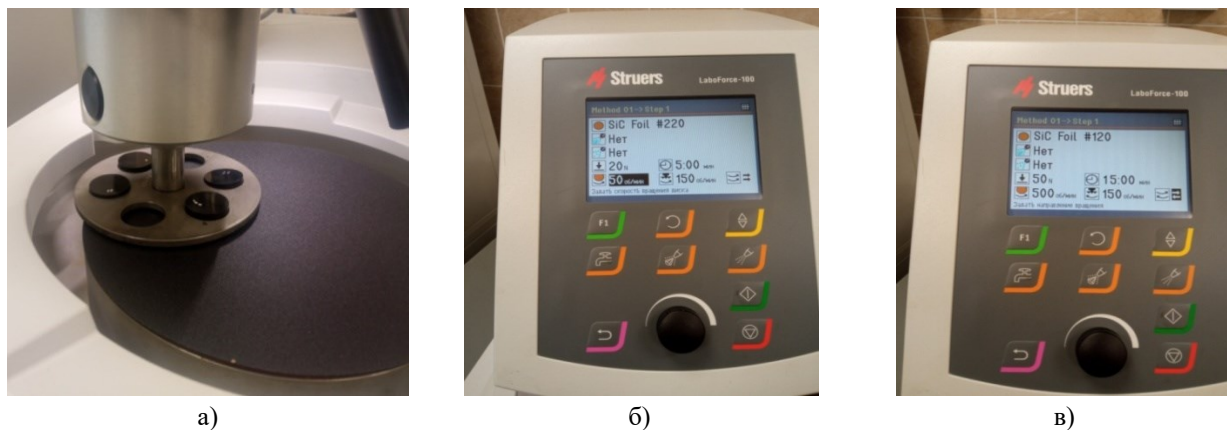


Рис. 1. Общий вид шлифовально-полировальной машины при настройке
[Источник: <http://www.easymanua.ls/struers/labopol-30/manual?p=75>]
а) установленные образцы; б) параметры при приработке; в) основные параметры

где G_i – масса образцов до испытаний, г; G_{Hi} – масса образцов после испытаний, г.

Для приведения результатов износа к нормативной площади определяем коэффициент корректировки k_i по формуле

$$k_i = S_i / S_n, \quad (2)$$

где S_i – текущая площадь образцов, см^2 ; S_n – нормативная площадь, см^2 ($S_n = 1 \text{ см}^2$).

Скорректированный абсолютный износ образцов ΔG_{ksi} , г, вычисляем по формуле

$$\Delta G_{ksi} = \Delta G_i k_i, \quad (3)$$

где ΔG_i – абсолютный износ образцов, г; k_i – корректировочный коэффициент.

Интенсивность (скорость) изнашивания образцов $I(V)_{Gi}$, г/мин, вычисляем по формуле

$$I(V)_{Gi} = \Delta G_{ksi} / t, \quad (4)$$

где ΔG_{ksi} – абсолютный износ образцов, г; t – время основных испытаний, мин ($t = 60$ мин).

В качестве сопоставительного критерия оценки износа образцов сравниваемых дисков введем относительный износ, выраженный в долях единицы. Принимаем в качестве эталона данные по износу образца из серийного диска, тогда относительный износ i опытных дисков определяем по формуле

$$i = \frac{\Delta G_{ks_{0di}}}{\Delta G_{ks_{cди}}}, \quad (5)$$

где $\Delta G_{ks_{0di}}$ – абсолютный износ образцов опытных дисков, г; $\Delta G_{ks_{cди}}$ – абсолютный износ образца серийного диска, г.

Для проведения испытания на машине трения УМТ-200 изготовлена неподвижная часть, в виде оправки с канавкой, где размещается образец в форме квадрата. Для фиксации образец приклеивают к неподвижной части под шпинделем машины трения и центрируют посредством лазера. Неподвижная часть машины трения с за-

крепленным образцом представлена на универсальной машине трения УМТ-200 (рисунок 2). К машине трения перед испытаниями подключают ноутбук через USB кабель, закрепляют образец диска и устанавливают контробразец в виде Болт М8×60.12.9 DIN 933, при этом каждому образцу диска соответствует свой контробразец. На ноутбуке запускают программу *QMLab* и выполняют настройку модуля *QMS 10*: выводят измерительные тензометрические каналы – сила момента трения, сила прижатия образцов и температура (рис. 2).

Методика испытаний на универсальной машине трения УМТ-200 включала приработку и основные испытания. Приработку контактных поверхностей образца и контробразца выполняем при следующих режимах: усилие прижатия – 5 Н (7,82 мВ по тарировочному графику тензодатчика) и частоте вращения шпинделя с контробразцом 200 мин^{-1} , время приработки – 1 мин. Основные испытания проводим на рабочих режимах: усилие прижатия – 42,5 Н (24,38 мВ по тарировочному графику тензодатчика) и частоте вращения шпинделя 200 мин^{-1} , время испытаний – 5 мин. Уровень нагружения обоснован для ускорения испытания за счет ужесточения нагрузки, так как рабочая нагрузка 42,5 Н превышает силу сопротивления почвы на диск 13,25...16,33 Н примерно в 2,6...3,2 раза, с учетом площади головки контробразца [11]. С целью графической иллюстрации процесса триботехнических испытаний рабочие графики изменения силы прижатия и силы момента сопротивления в процессе испытаний приведены на рисунке 3 [12]. На графиках можно выделить три характерных стадии: первая – незначительный рост силы сопротивления, вторая – амплитудное изменение сил сопротивления и прижатия образцов, третья – стабилизация показаний тензорезисторов.

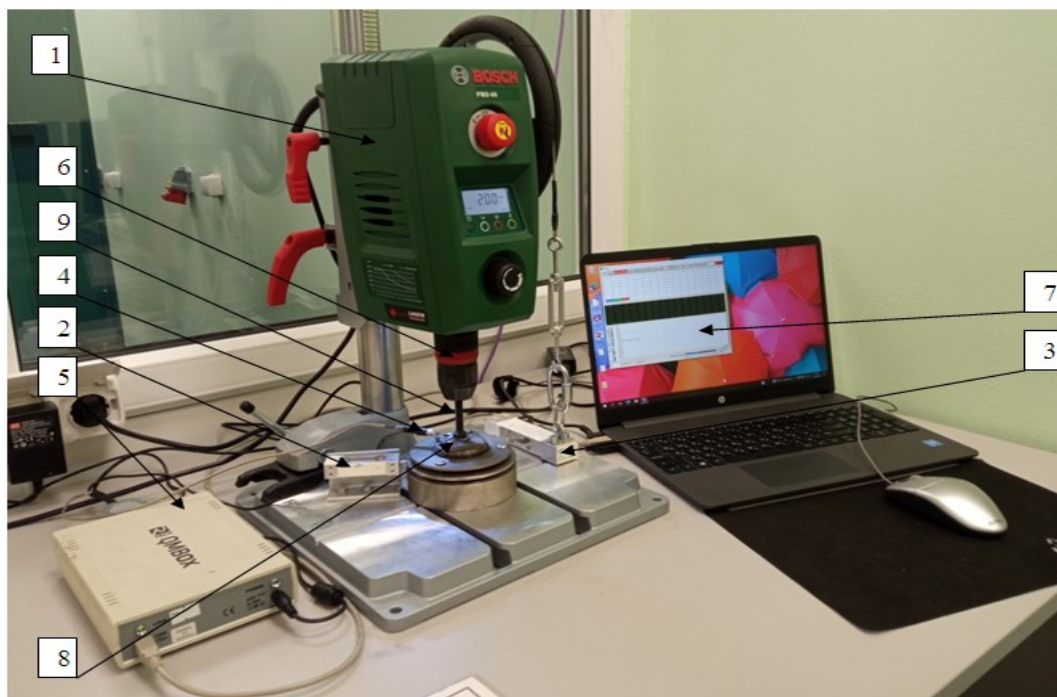
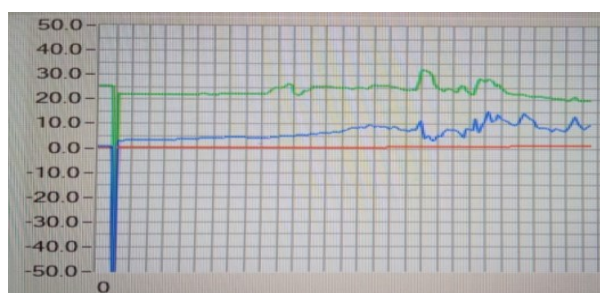
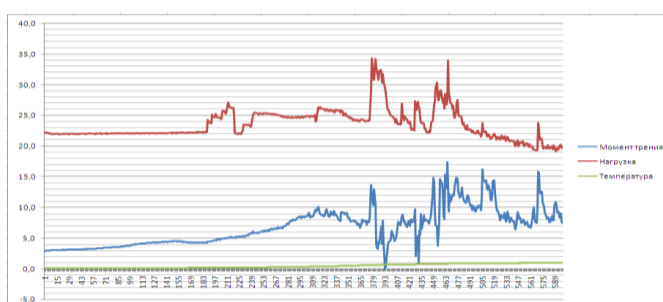


Рис. 2. Общий вид универсальной машины трения УМТ-200 [Источник: <http://машинатрения.рф/mtv>]
 1 – привод (сверлильный станок); 2 – тензодатчик силы момента трения; 3 – тензодатчик усилия прижатия;
 4 – датчик температуры; 5 – аналитический модуль QMbox; 6 – шпиндель привода (сверлильного станка);
 7 – ноутбук с программным обеспечением; 8 – оправка с образцом; 9 – контрообразец



а) графики в модуле QMlab



б) графики, уточненные в Microsoft Excel

Рис. 3. Графическая иллюстрация процесса испытаний образца серийного диска СД 1

Оценку износостойкости проводим по коэффициенту трения $f_{\text{Тр}i}$, который вычисляем по формуле [13, 14]

$$f_{\text{Тр}i} = \frac{M_{\text{Тр}i}}{(N_i \cdot R_{\text{ко}i})} = \frac{(F_{oi} \cdot R_{ki})}{(P_i \cdot k_{\text{пр}} \cdot R_{\text{ко}i})} \quad (6)$$

где $M_{\text{Тр}i}$ – момент трения образца, Нм; N_i – нагрузка на образец, Н, в нашем случае $N_i = P_i$; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент прилегания контрообразца к образцу диска, исходя из триботехнических испытаний принимаем 0,9 [13, 15]; $R_{\text{ко}i}$ – радиус окружности зоны износа головки контрообразца после испытаний, м; F_{oi} – сила момента трения, Н; R_{ki} – радиус окружности зоны износа образца после испытаний, м.

Основная часть. При проведении испытаний на первом этапе исследования процесса изнашивания испытаны двенадцать образцов в три серии – четыре вида образцов дисков (СД, СУД,

ЭУД, ВУД) в трехкратной повторности. Результаты оценки опытных и расчетных величин по образцам дисков на основе формул (1) - (5) представлены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает: 1) наибольший износ по массе наблюдается у образцов СД – $\Delta G_{\text{КСД}} = 0,477$ г, интенсивность изнашивания $I(V)_{\text{ГСД}} = 0,795 \times 10^{-2}$ г/мин, относительный износ – $i_{\text{СД}} = 1$; 2) наименьший износ по массе наблюдается у опытных дисков (по возрастанию): у образцов ЭУД – $\Delta G_{\text{КСЭУД}} = 0,250$ г, интенсивность изнашивания $I(V)_{\text{ГЭУД}} = 0,417 \times 10^{-2}$ г/мин, относительный износ – $i_{\text{ЭУД}} = 0,52$; у образцов СУД – $\Delta G_{\text{КССУД}} = 0,340$ г, интенсивность изнашивания $I(V)_{\text{ГСУД}} = 0,567 \times 10^{-2}$ г/мин, относительный износ – $i_{\text{СУД}} = 0,71$; у образцов ВУД – $\Delta G_{\text{КСВУД}} = 0,367$ г, интенсивность изнашивания $I(V)_{\text{ГВУД}} = 0,612 \times 10^{-2}$ г/мин, относительный износ – $i_{\text{ВУД}} = 0,77$.

Таблица 1

Результаты испытаний на изнашивание

Образцы / повторность	Наименование параметров					
	абсолютный износ ΔG_i , г	площадь	коэффициент корректировки	скорректированный абсолютный износ	интенсивность изнашивания	относительный износ
	Среднее	S_i , мм ²	k_i	ΔG_{ksi} , г	$I(V)_{Gi} \times 10^{-2}$, г/мин	i
СД 1	0,36	135	1,35	0,486	0,810	1
СД 2	0,35	134	1,34	0,469	0,782	1
СД 3	0,36	132	1,32	0,475	0,792	1
Среднее	-	-	-	0,477	0,795	1
СУД 1	0,30	144	1,44	0,432	0,720	0,89
СУД 2	0,26	108	1,08	0,281	0,468	0,60
СУД 3	0,26	118	1,18	0,307	0,512	0,65
Среднее	-	-	-	0,340	0,567	0,71
ЭУД 1	0,21	122	1,22	0,256	0,427	0,53
ЭУД 2	0,21	121	1,21	0,254	0,423	0,54
ЭУД 3	0,19	126	1,26	0,239	0,398	0,50
Среднее	-	-	-	0,250	0,417	0,52
ВУД 1	0,31	125	1,25	0,388	0,647	0,80
ВУД 2	0,28	111	1,11	0,311	0,518	0,66
ВУД 3	0,32	126	1,26	0,403	0,672	0,85
Среднее	-	-	-	0,367	0,612	0,77

При проведении испытаний на втором этапе исследования процесса трения испытаны двенадцать пар образцов и контрообразцов по четырем видам дисков (СД, СУД, ЭУД, ВУД) в трехкратной повторности. Получены опытные данные по тензодатчику момента трения, тензодатчику усилия прижатия и температуры, обработаны в аналитическом модуле *QMbox* и программе *QMLab* в виде получения бинарных данных, последующего перевода в текстовой формат с помощью

модуля *QMParse* и их графического представления в *Microsoft Excel*. Для расчета получены средние значения сил моментов трения по серийному и опытным образцам F_{oi} , Н; средние значения сил по прижатию контрообразцов к серийным и опытным образцам P_i , Н [16]. Результаты оценки опытных и расчетных величин коэффициента трения скольжения по образцам дисков на основе формулы (6) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на трение

Образцы / повторность	Наименование параметров					
	сила прижатия образцов	сила момента трения образцов	температура	радиус окружности зоны износа контрообразца	радиус окружности зоны износа образца	коэффициент трения
	P_i , Н	F_{oi} , Н	T_i , °C	R_{koi} , мм	R_{ki} , мм	f_{TPi}
СД 1	4,000	0,950	54	6,83	6,56	0,253
СД 2	4,300	0,750	58	6,88	5,73	0,161
СД 3	4,650	0,800	56	6,48	4,38	0,123
Среднее	-	-	56	-	-	0,179
СУД 1	4,600	0,315	46	6,76	3,67	0,041
СУД 2	4,200	1,130	62	6,53	4,04	0,185
СУД 3	4,100	1,300	58	6,69	4,09	0,215
Среднее	-	-	55	-	-	0,147
ЭУД 1	4,750	0,375	54	6,62	3,33	0,044
ЭУД 2	4,500	0,830	52	7,13	3,69	0,106
ЭУД 3	4,600	0,690	50	7,00	4,38	0,105
Среднее	-	-	52	-	-	0,085
ВУД 1	4,600	0,700	42	6,78	5,30	0,132
ВУД 2	4,240	0,900	54	7,03	4,40	0,148
ВУД 3	4,680	0,400	52	7,11	5,12	0,068
Среднее	-	-	49	-	-	0,116

Анализ данных таблицы 2 показывает: 1) наибольший коэффициент трения соответствует образцам СД – $f_{\text{трСД}}=0,179$; 2) значения коэффициента трения для образцов опытных дисков составляют (по возрастанию): образцы ЭУД – $f_{\text{трЭУД}}=0,085$, образцы ВУД – $f_{\text{трВУД}}=0,116$, образцы СУД – $f_{\text{трСУД}}=0,147$.

Выводы.

1. На основании обзора литературных источников и анализа нормативной-технической литературы разработана методика и подготовлены технические средства проведения лабораторных испытаний образцов серийных и опытных дисков сошников сеялки СЗТ-3,6А для триботехнической оценки на изнашивание и трение.

2. В результате проведения испытаний на изнашивание для исследуемых образцов серийных и опытных (серийных упрочненных, снятых с эксплуатации упрочненных и восстановленных упрочненных) дисков установлено, что повышение износостойкости образцов опытных дисков по сравнению с образцами серийных дисков составило – для СУД в 1,40 раза, ЭУД в 1,91 раз, ВУД в 1,30 раза, что свидетельствует о возможном повышении ресурса в среднем на 30...91 %.

3. По результатам испытаний на трение для исследуемых образцов серийных и опытных (серийных упрочненных, снятых с эксплуатации упрочненных и восстановленных упрочненных) дисков установлено снижение коэффициента трения поверхностей образцов опытных дисков по сравнению с образцами серийных дисков – СУД в 1,22 раза, ЭУД в 2,11 раз, ВУД в 1,54 раз, что обуславливает снижение потерь на трение в опытных образцах по сравнению с образцами серийными за счет более высокой твердости.

4. Сопоставительный анализ лабораторных испытаний образцов на изнашивание и трение с результатами ускоренных стендовых испытаний на износ серийных и опытных дисков сошников сеялки СЗТ-3,6А указывает на их сходимость, так как наиболее износостойкими опытными дисками по сравнению с серийными являются диски, снятые с эксплуатации упрочненные, далее восстановленные приваркой ремонтной детали упрочненные и затем серийные упрочненные диски.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Супонев И.А., Ерохин М.Н. Физико-механические свойства почв и их воздействие на рабочие органы почвообрабатывающих машин // Чтения академика В.Н. Болтинского: сборник статей, Москва, 22-23 января 2025 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. С. 304–309.

2. Ожегов Н.М., Ружьев В.А., Ловкис В.Б. Влияние физико-механических свойств почвы на

интенсивность изнашивания рабочей поверхности дисков высокоскоростных почвообрабатывающих машин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. №39. С. 286–290.

3. Нотов Р.А., Лебедев А.Т., Ангрыков Б.А., Абушинов О.А., Бадмаева Т.В., Лебедев П.А. Прогнозирование ресурса двухдисковых сошников зерновых сеялок // Наука в центральной России. 2019. № 6. С. 95–104. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-6-95-104.

4. Литвинова Т.А., Мецлер А.А., Пирожков Р.В. Исследование износостойкости покрытий, полученные методами газопорошковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки // Глобальная ядерная безопасность. 2016. № 1. С. 46–49.

5. Тюрин А.Г., Разумаков А.А., Терентьев Д.С., Нагавкин С.Ю., Иванцовский В.В. Исследование структуры и свойств твердых сплавов с градиентным строением // Материаловедение. 2012. № 4. С. 86–92.

6. Кроха В.А. Холодная пластическая деформация металлов как метод повышения их износостойкости // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 4. С. 23–30.

7. Лаптева В.Г., Куксенова Л.И., Алисин В.В., Герасимова Н.Г. Повышение износостойкости сталей и чугуна лазерной обработкой // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 3. С. 2–7.

8. Тарасов В.В., Трифонов И.С. Развитие метода изнашивания материалов по закреплённому абразиву // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т.17, № 1. С. 143–149.

9. Нотов Р.А., Лебедев А.Т. Работоспособность дисковых сошников зерновых сеялок в различных эксплуатационных условиях // Наука в центральной России. 2019. №6. С. 5–10. DOI: 10.35887/2305-2538-2019-6-5-10.

10. Волков М.И. Методика испытаний на износ дисков сошников и результаты её обработки // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2024. №3 (43). С. 5-12.

11. Пастухов А.Г., Волков М.И. Определение тягового сопротивления дискового сошника // Материалы XXIV Международной научно-производственной конференции «Инновационные решения в аграрной науке – взгляд в будущее» в 2 т. Том 1.п. Майский. 2020. С 55–56.

12. Ибатуллин И.Д., Журавлев А.Н., Утянкин А.В., Галлямов А.Р., Неяглова Р.Р. Стенд и методики триботехнических испытаний материалов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2011. № 3. С. 218-223.

13. Морозов А.В. Повышение долговечности гладких цилиндрических соединений при восстановлении электрохимической обработкой: Дисс. докт. техн. наук / А.В. Морозов; РГАУ МСХА им. Тимирязева, Ульяновский ГАУ им. П.А. Столыпина. М.: 2018. 458 с.

14. Хорев В.А. Антифрикционные композиционные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях трения: Дисс. канд. техн. наук / В.А. Хорева; СПбГТИ(ТУ). СПб.: 2025. 119 с.

15. Перепелкина С.Ю., Коваленко П.П., Печенко Р.В., Нуждин К.А. Методика исследования трибологических характеристик материалов на машине трения // Приборостроение. 2016. Т.59, № 8. С. 636–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-636-640.

16. Аркуша, А.И. Техническая механика: Теоретическая механика и сопротивление материалов. М.: Ленанд, 2016. 352 с.

Информация об авторах

Пастухов Александр Геннадиевич, доктор технических наук, профессор инженерного факультета. E-mail: pastuhov_ag@belgau.ru. Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, Майский, ул. Вавилова, д. 1.

Тимашов Евгений Петрович, доктор технических наук, доцент инженерного факультета. E-mail: timachov_ep@belgau.ru. Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, Майский, ул. Вавилова, д. 1.

Минасян Алексан Гургенович, кандидат технических наук, доцент инженерного факультета. E-mail: minasian_ag@belgau.ru. Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, Майский, ул. Вавилова, д. 1.

Волков Михаил Иванович, инженер-конструктор. E-mail: volkov.mikhail2017@yandex.ru. Закрытое акционерное общество «Сокол-АТС», Россия, 308023. Белгород, пр. Б. Хмельницкого, 137.

Поступила 20.02.2026 г.

© Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Минасян А.Г., Волков М.И., 2026

¹Pastukhov A.G., ¹Timashov E.P., ¹Minasyan A.G., ^{2,*}Volkov M.I.

¹Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorina

²Closed Joint Stock Company "Sokol-ATS"

*E-mail: volkov.mikhail2017@yandex.ru

TRIBOTECHNICAL PROPERTY STUDIES DISKS OF PLOUGHSHARES OF SOWING MACHINES

Abstract. Improving the efficiency of agricultural production is based on a high technical level of machines, which is due to the use of innovative technologies in agricultural engineering. In this regard, it is necessary to ensure the operability of the main working bodies of sowing machines when cultivating grain crops, in particular, for grain seeders - the operability of two-disc ploughshares. The purpose of the research is a comparative assessment of the tribotechnical properties of serial and experimental discs based on laboratory tests of samples. During the studies, a program was drawn up and a test methodology was developed in two stages: at the first stage, wear tests were carried out with an assessment of mass wear in order to compare the wear resistance of disk samples on a grinding machine in the LaboPol-30 and LaboForce-100 set; at the second stage, friction tests were carried out with an estimate of the sliding friction coefficient of the working surfaces on a universal UMT-200 friction machine. The test results showed that the ratio of the wear intensity of serial and prototypes is 1.3... 1.9, and the ratio of the friction coefficient of serial and prototypes is 1.22... 2.11. These results are highly comparable to the results of comparative accelerated bench tests of serial and experimental discs for wear.

Keywords: operability, sowing machines, resource, ploughshare discs, tribotechnical properties, wear, friction coefficient.

REFERENCES

1. Suponev I.A., Erokhin M.N. Physico-mechanical properties of soils and their effect on the working organs of tillage machines [Fiziko-mek-

hanicheskie svoystva pochv i ih vozdejstvie na rabochie organy pochvoobrabatyvayushchih mashin]. Readings by Academician V.N. Boltinsky: collec-

tion of articles, Moscow, January 22-23, 2025. Moscow: ООО "Sam Polygraphist", 2025. Pp. 304–309. (rus)

2. Ozhegov N.M., Ruzhev V.A., Lovkis V.B. The influence of physico-mechanical properties of soil on the wear rate of the working surface of discs of high-speed tillage machines [Vliyanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochvy na intensivnost' iznashivaniya rabochej poverhnosti diskov vysokoskorostnykh pochvoobrabatyvayushchih mashin]. Izvestiya St. Petersburg State Agrarian University. 2016. No. 39. Pp. 286–290. (rus)

3. Notov R.A., Lebedev A.T., Angrykov B.A., Abushinov O.A., Badmaeva T.V., Lebedev P.A. Forecasting the resource of two-disc coulters of grain seeders [Prognozirovanie resursa dvuhdiskovykh soshnikov zernovykh seyalok]. Science in central Russia. 2019. No. 6. Pp. 95–104. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-6-95-104. (rus)

4. Litvinova T.A., Metzler A.A., Pirozhkov R.V. Investigation of the wear resistance of coatings obtained by gas-powder and supersonic gas-powder surfacing [Issledovanie iznosostojkosti pokrytij, poluchennye metodami gazoporoshkovej i sverhzhukovoj gazoporoshkovej naplavki]. Global Nuclear safety. 2016. No. 1. Pp. 46–49. (rus)

5. Tyurin A.G., Razumakov A.A., Terentyev D.S., Nagavkin S.Yu., Ivantsivskiy V.V. Investigation of the structure and properties of hard alloys with a gradient structure [Issledovanie struktury i svoystv tverdykh splavov s gradientnym stroeniem]. Materials Science. 2012. No. 4. Pp. 86–92. (rus)

6. Krokha V.A. Cold plastic deformation of metals as a method of increasing their wear resistance [Holodnaya plasticheskaya deformaciya metallov kak metod povysheniya ih iznosostojkosti]. Repair, restoration, modernization. 2010. No. 4. Pp. 23–30. (rus)

7. Lapteva V.G., Kuksenova L.I., Alisin V.V., Gerasimova N.G. Increasing the wear resistance of steels and cast iron by laser treatment [Povysenie iznosostojkosti stalej i chuguna lazernoj obrabotkoj]. Repair, restoration, modernization. 2009. No. 3. Pp. 2–7. (rus)

8. Tarasov V.V., Trifonov I.S. Development of the method of wear of materials by fixed abrasive [Razvitie metoda iznashivaniya materiaov po zakreplennomu abrazivu]. Chemical physics and mesoscopy. 2015. Vol.17, No. 1. Pp. 143–149. (rus)

9. Notov R.A., Lebedev A.T. Efficiency of disc coulters of grain seeders in various operating conditions [Rabotosposobnost' diskovykh soshnikov zernovykh seyalok v razlichnykh ekspluatacionnykh

usloviyah]. Science in central Russia. 2019. No. 6. Pp. 5–10. DOI: 10.35887/2305-2538-2019-6-5-10. (rus)

10. Volkov M.I. Methods of testing for wear of coulter discs and the results of its development [Metodika ispytaniy na iznos diskov soshnikov i rezul'taty eyo otrabotki]. Innovations in agriculture: problems and prospects. 2024. No. 3 (43). Pp. 5–12. (rus)

11. Pastukhov A.G., Volkov M.I. Determination of the traction resistance of a disc coulter [Opredelenie tyagovogo soprotivleniya diskov ogo soshnika]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Production Conference "Innovative Solutions in Agricultural Science - A Look into the Future" (May 27-28, 2020): in 2 volumes. Volume 1.p. May: Publishing House of FGBOU VO Belgorod SAU, 2020. Pp. 55–56. (rus)

12. Ibatullin I.D., Zhuravlev A.N., Utyankin A.V., Gallyamov A.R., Neyaglova R.R. Stand and methods of tribotechnical testing of materials [Stend i metodiki tribotekhnicheskikh ispytaniy materialov]. Bulletin of the Samara State Aerospace University. Samara: Publishing House of Samara National Research University. 2011. No. 3. Pp. 218–223. (rus)

13. Morozov A.V. Improving the durability of smooth cylindrical joints during restoration by electromechanical treatment [Povysenie dolgovechnosti gladih cilindricheskikh soedinenij pri vostanovlenii elektromekhanicheskoy obrabotkoj]: Diss. doct. Technical Sciences. Russian State Agricultural Academy named after Timiryazeva, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin. Moscow: 2018. 458 p. (rus)

14. Khorev V.A. Antifriction composite materials for use in extreme friction conditions [Antifrikcionnye kompozicionnye materialy dlya ekspluatatsii v ekstremal'nykh usloviyah treniya]: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. SPbGTI(TU). Spb.: 2025. 119 p. (rus)

15. Perepelkina S.Yu., Kovalenko P.P., Pechenko R.V., Nuzhdin K.A. Methodology for studying the tribological characteristics of materials on a friction machine [Metodika issledovaniya tribologicheskikh harakteristik materialov na mashine treniya]. Instrument-making. 2016. Vol. 59, No. 8. Pp. 636–640. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-636-640. (rus)

16. Arkusha A.I. Technical mechanics: Theoretical mechanics and strength of materials [Tekhnicheskaya mekhanika: Teoreticheskaya mekhanika i soprotivlenie materialov]. M.: Lenand, 2016. 352 p. (rus)

Information about the authors

Pastukhov, Alexander G. DSc, Professor. E-mail: pastuhov_ag@belgau.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, Russia, 308503, Belgorod reg., vil. Maysky, Vavilov str., 1.

Timashov, Evgeny P. DSc, Assistant professor. E-mail: timachov_ep@belgau.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, Russia, 308503, Belgorod reg., vil. Maysky, Vavilov str., 1.

Minasyan, Aleksan G. PhD, Assistant professor. E-mail: minasiyn_ag@belgau.ru. Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin, Russia, 308503, Belgorod reg., vil. Maysky, Vavilov str., 1.

Volkov, Mikhail I. Design-engineer. E-mail: volkov.mikhail2017@yandex.ru. Closed Joint-Stock Company "Sokol-ATS". Russia, 308023, Belgorod, B. Khmel'nitsky Ave., 137.

Received 20.02.2026

Для цитирования:

Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Минасян А.Г., Волков М.И. Исследования триботехнических свойств дисков сошников посевных машин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 134–142. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-134-142

For citation:

Pastukhov A.G., Timashov E.P., Minasyan A.G., Volkov M.I. Tribotechnical property studies disks of ploughshares of sowing machines. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 5. Pp. 134–142. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-134-142