

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

2

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**

№ 2, 2026 год

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

Vol. 2. 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	10.02.2026
Выход в свет	20/02/2026

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,35. Уч.-изд. л. 16,50. Тираж 35 экз. Заказ № 24

© 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:	10.02.2026

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).

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

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

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

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).

Ильвицкая 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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

- Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., Шаповалов Н.А.**
ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛИКАТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНЫ И ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА 8
- Тамов М.М.**
ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ БАЛОК С КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ
НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ 20
- Опарина Л.А., Огурцов В.А., Власова Е.А., Обухова Ю.Д.**
УПРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКВАРТИРНЫХ
ДОМОВ В ТЕЧЕНИЕ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА 30
- Ишмухаметова К.В., Баймуратова С.Х.**
ИДЕНТИЧНОСТЬ КАК РЕСУРС РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ В КОНТЕКСТЕ
АГЛОМЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ 39
- Золотарева М.В., Ачковский И.А.**
КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ПАРКОВОЙ ТЕРРИТОРИИ
НА ПРИМЕРЕ ЧИСТЯКОВСКОЙ РОЩИ В КРАСНОДАРЕ 52
- Тажур М.**
ОТКРЫТЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В ПОСТКОНФЛИКТНЫХ
СИРИЙСКИХ ГОРОДАХ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ 61

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.**
РАЗДЕЛЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПОПЕРЕЧНО-ПОТОЧНОМ
КЛАССИФИКАТОРЕ С ЖАЛЮЗИЙНОЙ РЕШЕТКОЙ 73
- Кожевников В.А.**
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ 84
- Чепчуров М.С., Санин С.Н., Баранов Д.С.**
МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ПРОИЗВОДСТВУ
КОРПУСОВ ЖЕСТЯНОЙ ТАРЫ 93
- Волков Д.И., Воробьев П.С.**
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ
ИНСТРУМЕНТА ОТ ЖЕЛАЕМОЙ ТРАЕКТОРИИ В ПРОЦЕССЕ
РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ РОБОТА 105
- Карелина М.Ю., Акулов А.А., Подгорный А.В., Логанов Н.В.**
СТОЙКОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ
К ПРИМЕНЯЕМЫМ АГРОХИМИКАТАМ 114
- Бондаренко Ю.А., Лозовая С.Ю., Шрубченко И.В., Явурик О.В., Баранов Д.С.**
ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЦАПФЫ ОПОРНОГО УЗЛА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА 125

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N., Shapovalov N.A.**
THE EFFECT OF THE HYDROTHERMAL TREATMENT METHOD
ON OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SILICATE MATERIALS BASED
ON CLAY AND VOLCANIC ASH 8
- Tamov M.M.**
NUMERICAL MODELS FOR SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE
BEAMS WITH FRP STIRRUPS 20
- Oparina L.A., Ogurtsov V.A., Vlasova E.A., Obukhova Y.D.**
EQUATION FOR ADAPTIVE DESIGN OF APARTMENT BUILDINGS DURING THEIR
LIFECYCLE 30
- Ishmukhametova K.V., Baymuratova S.Kh.**
IDENTITY AS A RESOURCE FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL TOWNS
IN THE CONTEXT OF AGGLOMERATION PROCESSES 39
- Zolotareva M.V., Achkovskij I.A.**
THE CONCEPT OF COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF PARK TERRITORY
ON THE EXAMPLE OF CHISTYAKOVSKAYA GROVE IN KRASNODAR 52
- Tajour M.**
OPEN PUBLIC SPACES IN POST-CONFLICT SYRIAN CITIES:
A STRATEGIC APPROACH TO RECOVERY 61

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F.**
SEPARATION OF BULK MATERIALS IN A CROSS-FLOW CLASSIFIER WITH
A LOUVERED GRID 73
- Chepchurov M.S., Sanin S.N., Baranov D.S.**
MODERNIZATION OF AUTOMATIC MACHINE FOR PRODUCING TIN CONTAINER
CASES 84
- Kozhevnikov V.A.**
THEORETICAL MODELING AND CALCULATION OF THE EFFECTIVENESS
OF USING A VAULT BREAKER IN A BUNKER 93
- Volkov D.I., Vorobyev P.S.**
MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF TOOL DEVIATIONS
FROM THE DESIRED TRAJECTORY IN ROBOTIC MACHINING CONSIDERING
THE ROBOT'S STIFFNESS 105
- Karelina M.Y., Akulov A.A., Podgorny A.V., Loganov N.V.**
RESISTANCE OF PERIPHERAL DEVICES OF VISION SYSTEMS
TO THE APPLIED AGROCHEMICALS 114
- Bondarenko Yu.A., Lozovaya S.Yu., Shrubchenko I.V., Yavurik O.V., Baranov D.S.**
STUDY OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF THE TRUNNION
OF THE SUPPORT UNIT USING THE NUMERICAL METHOD 125

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-8-19

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N., Shapovalov N.A.Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov***E-mail: kidanebab100@gmail.com.*

THE EFFECT OF THE HYDROTHERMAL TREATMENT METHOD ON OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF SILICATE MATERIALS BASED ON CLAY AND VOLCANIC ASH

Abstract. *The research presents results on the use of Debub deposit loam and volcanic ash in the production of silicate materials under autoclaved and non-autoclaved conditions. For autoclaved conditions, an optimal mixture achieved a compressive strength of 22.75 MPa, an average density of 1955 kg/m³, and water absorption of 6.31 % with a composition of 10 wt.% loam, 25 wt.% volcanic ash, and a mixture activity of 6%. The non-autoclaved method yielded a compressive strength of 20.14 MPa with 40 wt. % loam, 25 wt.% volcanic ash, and a mixture activity of 6%. The corresponding average density, water absorption, and softening coefficient for the non-autoclaved samples were 1926 kg/m³, 8.58%, and 0.91, respectively. While the strength indicators for non-autoclaved samples are slightly lower than those produced by the autoclaved method, they remain within the recommended values for silicate products. It has been established that rock-forming loam minerals and volcanic ash actively interact with lime during hydrothermal treatment, both during autoclaving and steaming, forming fine- and coarse-crystalline new formations that provide high strength to silicate materials. In the State of Eritrea, where cost and environmental impact are paramount, autoclave and, especially, non-autoclave technology represents an optimal solution for the production of building materials.*

Keywords: *Debub loam deposit, volcanic ash, autoclave and non-autoclave technology, silicate materials.*

Introduction. Loam is an optimal raw material for construction purposes, characterized by a combination of silt, sand, and clay. It combines the most advantageous characteristics of each component, achieving an ideal balance that effectively supports foundation structures. Its color is noticeably darker, and its texture is soft, dry, and crumbly. The suitability of loam as a foundation is primarily due to its consistently balanced physical properties, particularly its ability to regulate moisture retention at an optimal level [1–5].

Loam is defined by a content of 10–30 wt.% clay particles with a size less than 0.005 mm. Loam with a high clay content is designated as heavy loam, and with a low clay content, as light loam. There is a classification of coarse-grained, fine-sandy, and silty loams based on the ratio of sand grains of the corresponding size and silt or aleurite particles.

Loam can contain organic matter. Loam is primarily formed from the decomposition of rock minerals – feldspar [6–8]. Loam is often used as the main raw material in the brick manufacturing process. The quality of the final brick product largely depends on the quality of the raw materials included in its composition. Clays and loams used in brick production, depending on their quality, are used in pure form or mixed with various additives to achieve the required operational properties and increase their effectiveness as a building material. Potential additives to ensure the best quality bricks at minimal production costs may include substances such as sand, volcanic

ash, sawdust, peat, and other materials. The choice of raw materials also depends on the technological process in brick production [9–12].

One of the most important characteristics of clay, significantly affecting its suitability for brick production, is its plasticity [13–15]. The recommended plasticity for brick production ranges from 5% to 15%, depending on its granular (grain size) composition, meaning the presence of sand, dust, and the finest particles (less than 0.005 mm), which essentially constitute the clay substance. To obtain the highest quality bricks, it is crucial that the soil does not contain an excessive amount of clay. Therefore, the proportion of clay in the soil, defined as particles smaller than 2 μm, should be maintained within a range exceeding 5% but not exceeding 30%, thereby functioning as a binder. Additionally, coarse grains, particularly silt and sand, should have an average diameter of less than 5 mm, which contributes to the structural stability of the aggregate framework [14]. Clays with a high sand content (loams) are typically used in brick production without improvements.

Volcanic ash has been investigated as a potential raw material for various applications, depending on its mineralogical composition, chemical composition, and particle size distribution. It has been proposed for use as a partial cement replacement, as a filler in lightweight concretes and cellular blocks, and as a geopolymer [16–21]. Various studies con-

firm that the addition of volcanic ash to a clay mixture can improve the physical and mechanical characteristics of the final product, meeting the technical requirements established by design standards.

The purpose of this study is to investigate and compare the physico-mechanical properties of silicate materials obtained from local aluminosilicate materials under autoclave and non-autoclave hardening conditions (steam treatment at atmospheric pressure), as well as to determine the optimal component

ratios to achieve desired mechanical properties in both hardening modes.

Materials and Methods. The loam and volcanic ash used in this study were sampled in the State of Eritrea, Debub region, near the village of Adi Golgol and the Alid mountains, respectively. The plasticity of the loam is $I_p = 10$. The rock color is light gray. The predominant oxides in the loam and volcanic ash are SiO_2 , followed by Al_2O_3 and other important alkaline oxides (Table 1).

Table 1

Chemical composition of loam of the Dabub origin

Content of oxides, wt. %										
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	Na_2O	K_2O	Σ
67,15	19,41	3,10	0,42	1,56	2,00	0,03	0,18	2,61	3,34	99,80

Quartz is the main mineral in clay, followed by feldspar. Volcanic ash is predominantly an amorphous rock, which also contains a significant amount of feldspar. This study used sand conforming to Industry Standard 21-1-80 "Sand for the production of silicate products of autoclave hardening," selected in the area of the Keikh-Kor village. The chemical and mineralogical composition of volcanic sand is given in work [22].

The investigated loam and volcanic ash were pre-dried in a drying oven at 105 °C until a constant mass was achieved and then ground in a laboratory vibratory mill to obtain the desired specific surface area. The lime was ground to a specific surface area of 400 m²/kg. The particle size distribution of the loam and volcanic ash was determined using a Fritsch ANALYSETTE 22 MicroTec plus particle size analyzer.

Preparation of the raw materials included precise mixing of the dry ingredients in the required ratio, and moistening with water. After this, the mixture was stored in a sealed container until the lime was completely slaked.

Cylindrical samples, each with a diameter and

height of 25 mm, were fabricated using a hydraulic press at a pressing pressure of 20 MPa. The samples underwent two different hardening processes. Autoclaved samples were exposed to saturated steam at a pressure of 1 MPa for 6 hours. In contrast, non-autoclaved samples underwent controlled heat and humidity treatment, maintaining a steam temperature of 95 °C for 12 hours. Morphological and microstructural characterization of the prepared samples was performed using a TESCAN MIRA 3 LMU scanning electron microscope.

An orthogonal central composite design was used in the experiment to investigate the influence of three material components: loam (x_1), volcanic ash (x_2), and active CaO (x_3). Each of these variables was systematically varied at three different levels: a central level (0), a lower level (-1), and an upper level (+1), with each level separated from the central point by a specific differential value (Δx_i) (Table 2). The primary data obtained from these experiments were subjected to detailed analytical calculation to determine the coefficients of the regression equation, which, in turn, would characterize the physical and mechanical properties of the material.

Table 2

Experimental planning conditions

Factors	Levels of variation			The range of variation
	-1	0	+1	
Content of loam, wt. % (x_1)	10	25	40	15
Content of volcanic ash, wt. % (x_2)	5	15	25	10
Content of CaO_{act} (x_3)	6	8	10	2

The study investigated the relationship between the composition of synthesized samples and their resulting mechanical properties, specifically compressive strength (R_C), average density (ρ), water absorption (ω), and softening coefficient (K_S). Statistical software was used to process the data, create a data matrix, and construct graphs illustrating the correlations between composition and properties for both autoclave and non-autoclave hardening methods.

Results and discussion. Loam exhibits a particle size range of 0.5 to 45 microns, indicating a relatively broad particle size distribution (Fig. 1). The presence of five distinct peaks suggests a heterogeneous composition, likely including various mineral phases or different degrees of aggregation. The most significant absorption intensity in the 2 to 3 micron range indicates a predominant fraction within this

size range. This intermediate particle size can provide a good balance between reactivity (due to sufficient surface area) and ease of handling. The next significant peaks at 0.6 microns and in the 0.4 to 0.6 micron range indicate the presence of finer fractions. These very fine particles possess a large specific surface area, which is extremely favorable for hydrothermal reactions, as it provides more sites for dissolution and subsequent precipitation of new phases.

Volcanic ash with a particle size range of 0.1 to 45 microns also exhibits a broad distribution but with six distinct peaks, suggesting an even more complex or diverse particle population compared to loam. The highest peak intensity observed in the 0.4 to 0.6 micron range indicates a significant proportion of very fine particles. This is a critical characteristic of volcanic ash in hydrothermal synthesis, as fine volcanic ash particles are known to be highly reactive due to their amorphous or weakly crystalline nature and large surface area. The next significant peak at 4 microns represents a larger fraction that can contribute to the long-term development of the silicate structure.

Different, yet complementary, particle size distributions of loam and volcanic ash indicate significant synergistic potential in the production of hydrothermal silicate materials. The combination of very fine, reactive particles with somewhat coarser fractions can lead to improved dissolution kinetics, controlled nucleation and growth, increased packing density, and ultimately, the formation of promising silicate materials with tailored properties

Materials obtained under autoclave conditions were studied. The average density of the material initially increased with increasing loam content, reaching a peak at 20 wt.% loam with a density of 1922 kg/m³. After this value, the density begins to decrease, suggesting that higher loam content may lead to a less compact structure or different hydration products under hydrothermal conditions (Table 3).

Compressive strength demonstrates a similar trend to density, initially increasing and then decreasing. The maximum compressive strength of

25.86 MPa is achieved at a loam content of 30 wt.% (Fig. 2). This indicates that a moderate amount of loam positively affects the material's bearing capacity. The decrease after 30 wt.% may be due to an excess of loam hindering the formation of strong calcium hydrosilicate (CSH) phases, which are crucial for the strength of autoclaved silicate materials.

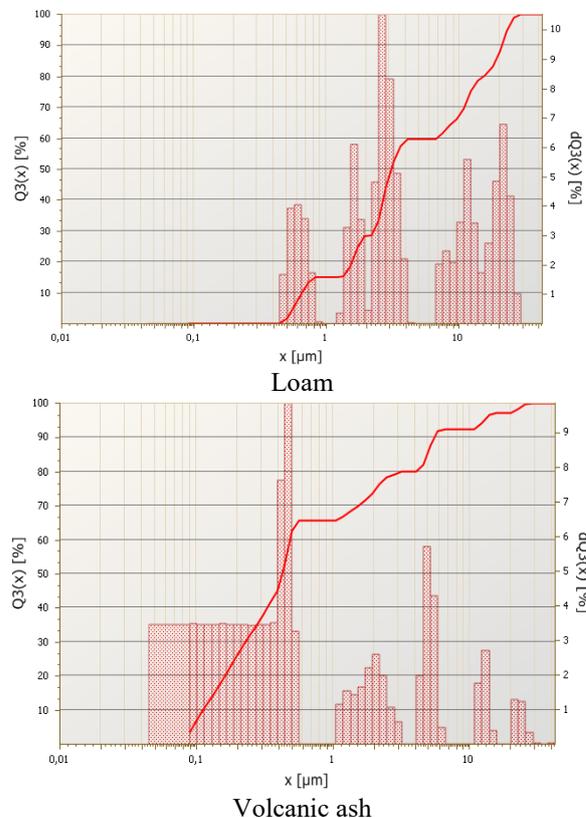


Fig. 1. Particle size distribution for loam and volcanic ash

Water absorption generally decreases with increasing loam content up to a certain level, indicating improved resistance to water penetration. The lowest water absorption, 8.02%, is observed at a loam content of 20 wt.%. However, at loam contents exceeding 30 wt.%, water absorption begins to increase again, possibly due to the formation of more hydrophilic clay-rich phases or an increase in overall porosity.

Table 3

Dependence of the physico-mechanical properties on loam content (control)

Loam content, mass %	Density, kg/m ³	Compressive strength, MPa	Water absorption, %	Coefficient of softening
0	1812	17,65	11,70	0,79
5	1831	17,07	12,09	0,82
10	1881	20,52	10,37	0,78
20	1922	25,34	8,02	0,86
30	1913	25,86	8,72	0,92
40	1850	22,50	11,92	0,85
50	1780	16,29	14,87	0,9

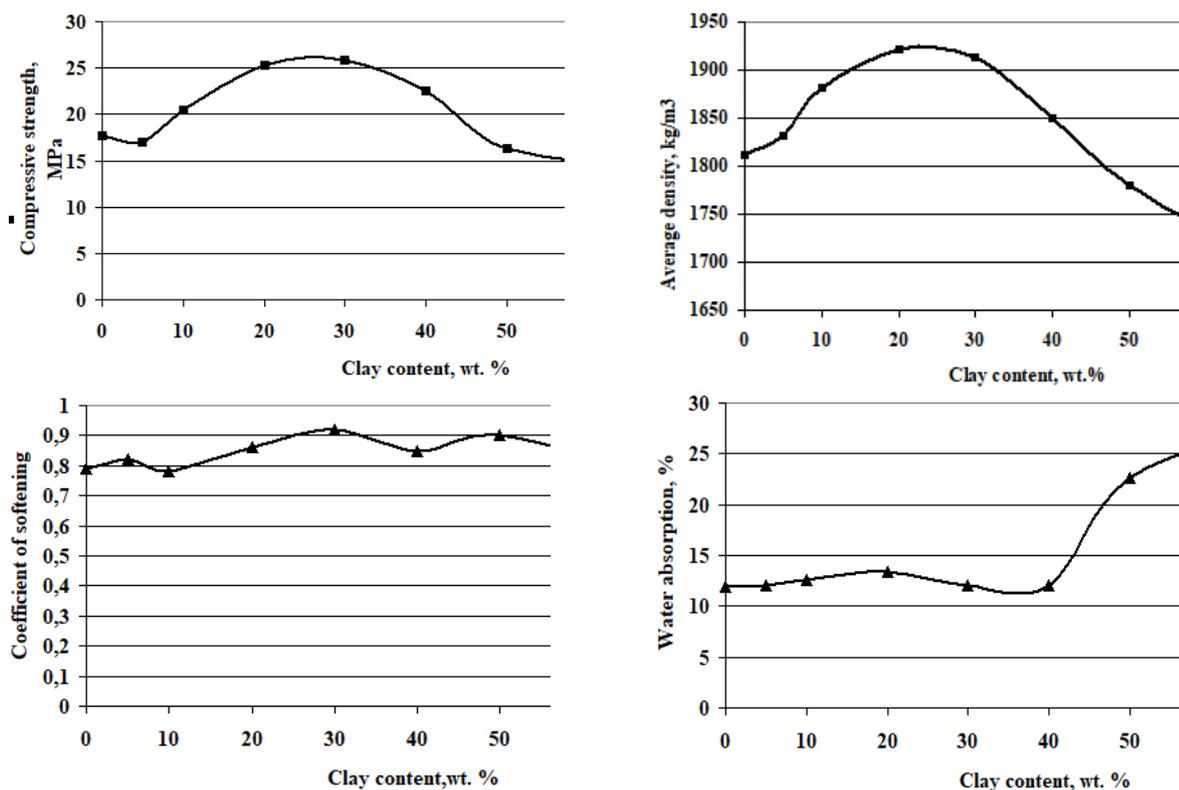


Fig. 2. Dependence of compressive strength, average density, water absorption and coefficient of softening on loam content (control)

The softening coefficient, which indicates a material's ability to retain strength when saturated with water, generally improves with increasing loam content. The highest water resistance coefficient, equal to 0.92, is achieved at a loam content of 30 wt.%. This suggests that loam, up to a certain percentage, can increase the durability of the material in a wet environment. A slight decrease at 40 wt.% and 50 wt.% loam content, despite still being relatively high, may indicate a change in the material's microstructure or the nature of hydration products that are less stable in water.

The optimal range for loam content in autoclaved silicate materials, considering a balance of density, high compressive strength, low water absorption, and excellent water resistance, is 20 to 30 wt. %. Specifically, a loam content of 30 wt. % yields

the highest compressive strength and water resistance coefficient. This range is crucial for achieving desired material properties in construction and other applications where durability and performance under various environmental conditions are paramount. The inclusion of loam in this proportion contributes to the formation of stable silicate structures during the autoclaving process, enhancing the overall mechanical and physical characteristics of the final product

The compressive strength (R_c) of silicate materials obtained by two different methods—autoclave and non-autoclave—is represented by two different regression equations. Each equation includes three key parameters: content of loam (x_1), content of volcanic ash (x_2), and content of CaO (x_3).

Autoclave method:

$$R_c = 12,043 + 0,555x_1 + 2,586x_2 + 0,541x_3 + 2,768x_1^2 + 2,113x_2^2 + 1,518x_3^2 - 1,863x_1x_2 + 0,215x_1x_3 - 0,775x_2x_3$$

Non-autoclave method:

$$R_c = 13,242 + 1,659x_1 + 4,176x_2 - 0,083x_3 + 0,793x_1^2 + 0,138x_2^2 - 0,457x_3^2 - 0,143x_1x_2 - 0,265x_1x_3 - 0,672x_2x_3$$

Volcanic ash significantly increased compressive strength in both methods, with a positive coefficient (+4.17) being higher in the non-autoclaved method compared to the autoclaved method. Lime content has less influence on compressive strength compared to loam and volcanic ash in both methods,

with a negative effect observed in the non-autoclaved method. Interaction terms between components indicate that their combined effect can either increase or decrease compressive strength. In the autoclaved method, negative interaction terms (-1.863) between loam and volcanic ash suggest that, although both components individually have a

positive effect on strength, their combination may not yield optimal results.

In the autoclave method, an increase in loam content positively affects compressive strength, but this effect is mitigated by interaction with other components, especially volcanic ash (negative interaction term). In contrast, the non-autoclave method favors a combination of high loam content and high volcanic ash content.

The compressive strength under autoclaved conditions with 10 wt. % loam and 25 wt. % volcanic

ash content is 22.78 MPa, 20.79 MPa, and 21.87 MPa for 6, 8, and 10 wt. % CaO, respectively (Fig. 3,a). For the non-autoclaving method, the best results were obtained with 40 wt. % loam and 25 wt. % volcanic ash content, where the compressive strength is 20.43 MPa, 19.87 MPa, and 18.39 MPa for 6, 8, and 10 wt. % CaO, respectively (Fig. 3,b). This method benefits from a synergistic effect between high loam content and high volcanic ash content, which allows for the creation of a stronger matrix under atmospheric pressure conditions.

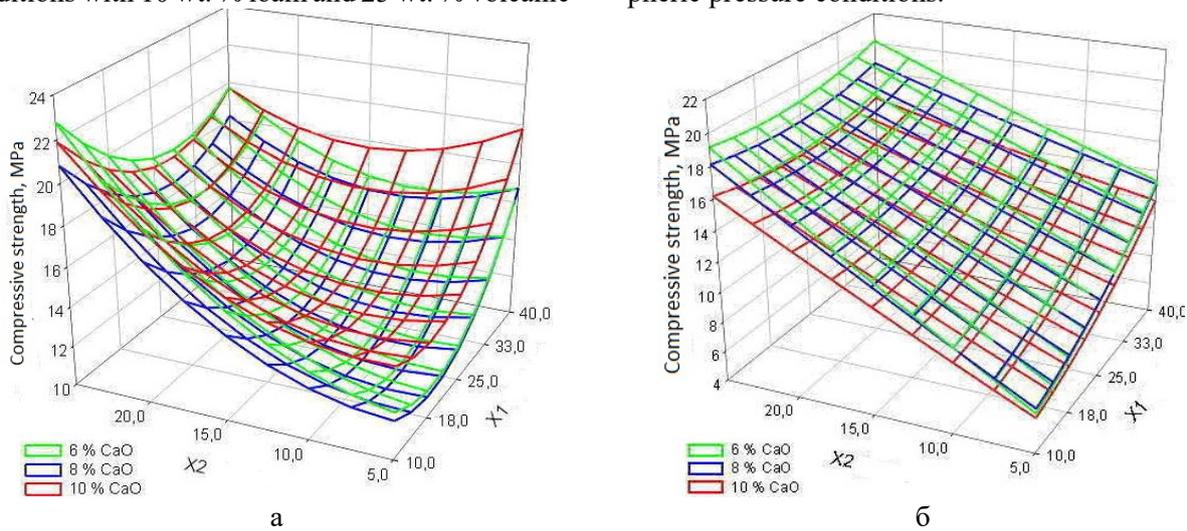


Fig. 3. Dependence of compressive strength on loam, volcanic ash and active CaO contents for autoclave (a) and non-autoclave (b) methods, respectively

Although both methods use similar raw materials, their optimal composition for achieving maximum compressive strength differs significantly due to processing conditions (high pressure versus atmospheric pressure). Achieving maximum compressive strength requires a high volcanic ash content combined with a low loam content. In the absence of an autoclave, a significant proportion of loam and volcanic ash is necessary to ensure structural integrity, as silica (sand) is practically unreactive at atmospheric pressure and a low temperature of 95 °C.

This condition contrasts with autoclaving, where elevated temperatures and pressures promote the dissolution and reaction of silica, contributing to structure formation. The limited reactivity of sand under the given conditions means that alternative, more reactive pozzolanic materials such as loam and volcanic ash are crucial for developing desired mechanical properties and a binding matrix.

The two regression equations obtained for the average density were as follows:

For the autoclave method:

$$\rho = 1870,711 - 41,1x_1 - 29,8x_2 - 24,1x_3 + 6,680x_1^2 + 25,18x_2^2 + 2,68x_3^2 - 26,75x_1x_2 - 8,25x_1x_3 - 10x_2x_3$$

For non-autoclave method:

$$\rho = 1876,586 - 38,1x_1 - 26,4x_2 - 36,1x_3 - 4,649x_1^2 + 13,851x_2^2 - 8,649x_3^2 - 24,25x_1x_2 - 10,5x_1x_3 - 16,75x_2x_3$$

Under non-autoclaved conditions, the initial material density is slightly higher (1876 kg/m³) compared to conditions after autoclaving (1871 kg/m³). This initial difference suggests that the curing method itself affects the initial material density before accounting for changes in components.

Both processes show an overall decrease in density as the concentration of loam, volcanic ash, and lime increases (indicated by negative linear coeffi-

icients). Interaction terms are predominantly negative, implying that the combination of these components often leads to a further reduction in density. The negative interaction terms, especially for x_1x_3 and x_2x_3 , tend to be stronger (more negative) in the non-autoclaved process. This suggests that the combined effect of these components on density reduction is more pronounced without autoclaving.

In the autoclaving process, a positive quadratic effect is observed for loam, which suggests a potential reversal or slowing down of the density decrease at higher loam levels. Conversely, in the non-autoclaving process, a negative quadratic effect is observed, indicating that density continues to decrease, possibly at an accelerating rate, with increasing loam content. In the autoclaving process, a positive quadratic effect is observed for lime, whereas in the non-autoclaving process, a negative quadratic effect is observed. This is a significant difference, implying that the behavior of lime at higher concentrations varies significantly between the two curing methods. The presence of quadratic and interaction terms underscores the non-linear nature of these relationships. Simple linear models would be insufficient to

describe the full behavior. Orthogonal central composite design is effective for investigating such complex response surfaces.

During the autoclaving process, the maximum density was 1955 kg/m³, which was observed at the lowest concentrations of all three components: 10 wt.% loam, 5 wt.% volcanic ash, and 6% lime (Fig. 4, a). In contrast, the minimum density during autoclaving was 1765 kg/m³, which was recorded at the highest concentrations of the components: 40 wt.% loam, 25 wt.% volcanic ash, and 10% lime. During the steaming process, the maximum density achieved was 1926 kg/m³, which was also observed at the lowest concentrations of all three components (Fig. 4, b). The minimum density during the steaming process was 1720 kg/m³, which was observed at the highest concentrations of all three components.

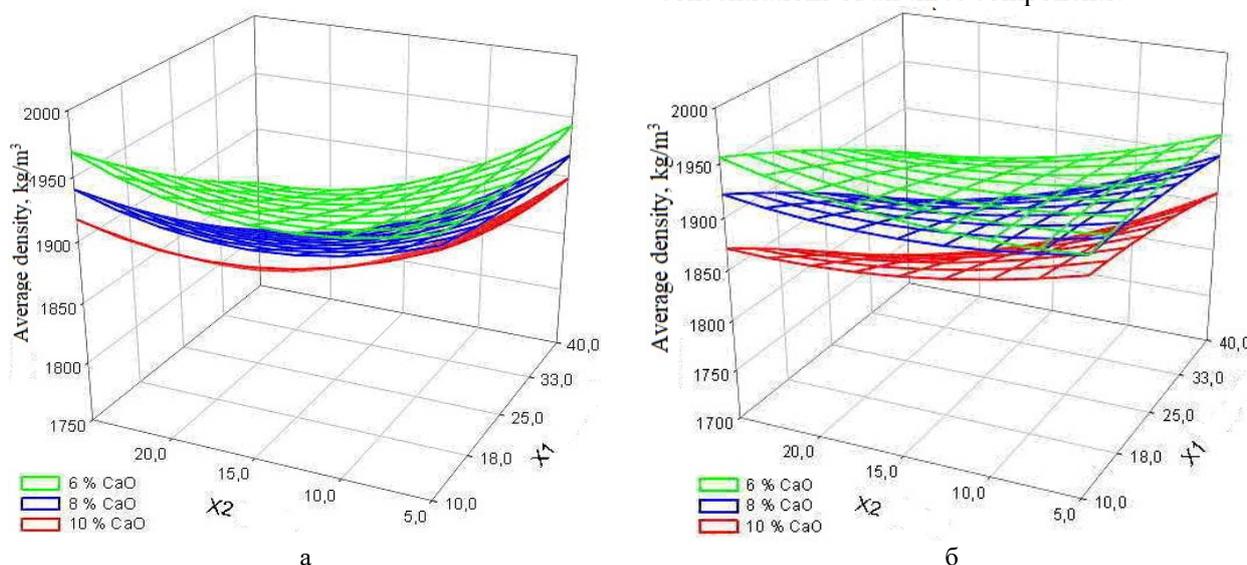


Fig. 4. Dependence average density on loam, volcanic ash and active CaO contents

The regression equations of water absorption for autoclave (a) and non-autoclave (b) methods, respectively.

The most significant difference between the two methods lies in the effect of volcanic ash (x_2) and the interaction between loam and active CaO (x_1x_3). In the autoclaved method, volcanic ash initially reduces water absorption, whereas in the non-autoclaved method, it has a more negative effect. Furthermore,

$$\omega = 9,01 + 1,14x_1 - 0,611x_2 + 0,276x_3 + 0,652x_1^2 + 0,317x_2^2 - 0,158x_3^2 + 0,758x_1x_2 - 0,29x_1x_3 + 0,432x_2x_3$$

$$\omega = 8,865 + 0,882x_1 - 1,511x_2 + 0,876x_3 + 0,768x_1^2 + 0,433x_2^2 - 0,042x_3^2 + 0,887x_1x_2 + 0,48x_1x_3 + 0,345x_2x_3.$$

The minimum water absorption coefficient for the autoclaved method is 6.31%, which is achieved with a composition including 10 wt.% loam, 25 wt.% volcanic ash, and 6% active CaO (Fig. 5). The maximum water absorption coefficient for the autoclaved method is 11.53%, which is achieved with a composition including 40 wt.% loam, 25 wt.% volcanic ash, and 10% active CaO. For the non-autoclaved method, the minimum water absorption coefficient is

the interaction between loam and active CaO is antagonistic in the autoclaved method but synergistic in the non-autoclaved method. These differences highlight that curing conditions (autoclaved versus non-autoclaved) significantly alter material hydration and porous structure development, thereby influencing water absorption characteristics as follows:

6.00%, observed with a composition including 10 wt.% loam, 25 wt.% volcanic ash, and 6% active CaO. The maximum water absorption coefficient for the non-autoclaved method is 12.53%, which is achieved with a composition including 40 wt.% loam, 5 wt.% volcanic ash, and 10% active CaO. These water absorption values (from 6% to 13%) are within the permissible range for building bricks.

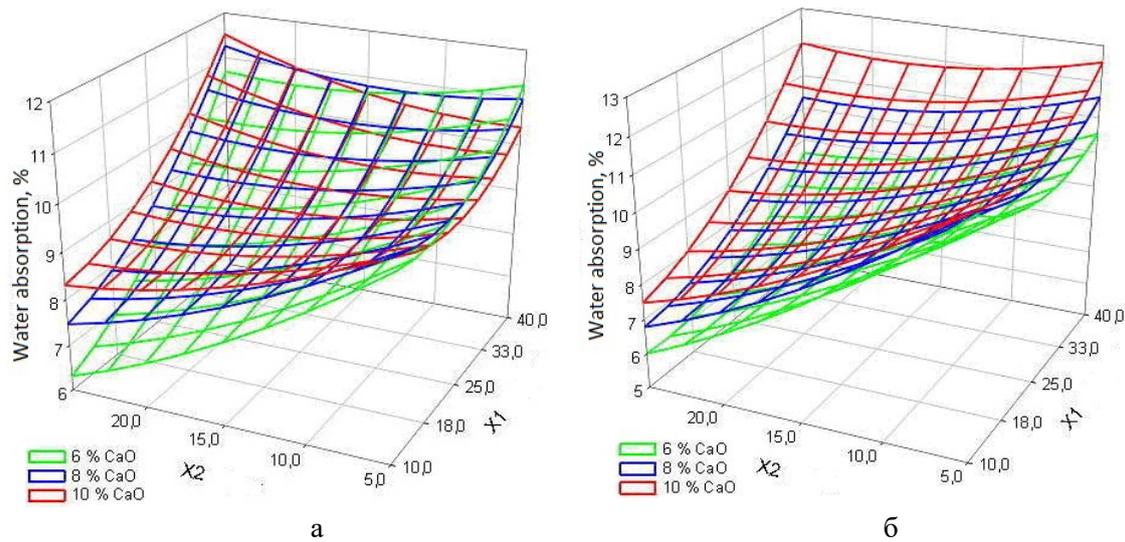


Fig. 5. Dependence of water absorption on loam, volcanic ash and active CaO contents for autoclave (a) and non-autoclave (b) methods, respectively

The softening coefficient for the autoclave method is:

$$K_S = 0,8354 - 0,0036x_1 + 0,0289x_2 + 0,0058x_3 - 0,0163x_1^2 + 0,0558x_2^2 + 0,0138x_3^2 + 0,0046x_1x_2 - 0,0044x_1x_3 - 0,0134x_2x_3$$

The softening coefficient for the non-autoclave method is:

$$K_S = 0,8433 - 0,026x_1 + 0,0160x_2 - 0,003x_3 - 0,0304x_1^2 - 0,3958x_2^2 + 0,0146x_3^2 - 0,0125x_1x_2 + 0,01x_1x_3 - 0,0675x_2x_3$$

In autoclaving conditions, the most significant quadratic effects are those of volcanic ash (0.0558) and active CaO (0.0138), both of which are positive, indicating that moderate to high levels of volcanic ash and active CaO generally improve water resistance under autoclaving. The negative quadratic term for loam ($-0.0163x_1^2$) suggests that extreme levels of loam content, both very low and very high, may reduce water resistance, with an optimal range likely around the central level. Interaction terms are relatively small, but the negative coefficient (-0.0134) implies that high levels of both volcanic ash and active CaO simultaneously might have a slight negative impact on water resistance, possibly due to competing reactions or microstructural changes.

In steaming conditions, the most prominent effects are the highly negative quadratic effect of volcanic ash (-0.3958) and the negative linear effect of loam (-0.026). This indicates that high levels of volcanic ash content significantly reduce non-autoclaved water resistance, and an increase in loam content generally lowers water resistance in this curing environment. The positive linear term for volcanic ash (0.016) suggests a complex relationship where an initial increase in volcanic ash might be beneficial, but at higher contents, the strong negative quadratic term predominates. The negative interaction term (-0.0675) is also significant, implying that the combination of higher volcanic ash content and active CaO is particularly detrimental to non-autoclaved water resistance, possibly due to insufficient

activation of the pozzolanic reaction or unfavorable phase formation.

For samples subjected to autoclaving, water resistance ranged from 0.798 (with 40 wt% loam, 5 wt% volcanic ash, and 10% lime) to 0.901 (with 10 wt% loam, 25 wt% volcanic ash, and 8% lime) (Fig. 6). In contrast, for non-autoclaved samples, water resistance showed a wider range, from 0.375 (with 10 wt% loam, 5 wt% volcanic ash, and 6% lime) to 0.857 (with 25 wt% loam, 15 wt% volcanic ash, and 8% lime). These results highlight the significant impact of curing conditions and material composition on the water resistance of the investigated materials.

The introduction of volcanic ash in combination with autoclaving presents an alternative to the clay-sand mixture. While the latter provides the highest compressive strength, the autoclaved method using volcanic ash offers a better balance of properties, particularly excelling in density and water absorption, which are crucial for durability and performance. The lower water absorption of the autoclaved volcanic ash mixture is a significant advantage, indicating increased resistance to environmental exposure. The use of steam curing, although potentially more cost-effective due to lower energy consumption, results in lower compressive strength and higher water absorption. The optimal composition for the autoclave method (10 wt.% clay, 25 wt.% volcanic ash, 6% lime) also uses less loam than loam-only samples (30 wt.%), which may have environmental and economic advantages if volcanic ash is a more accessible or sustainable resource.

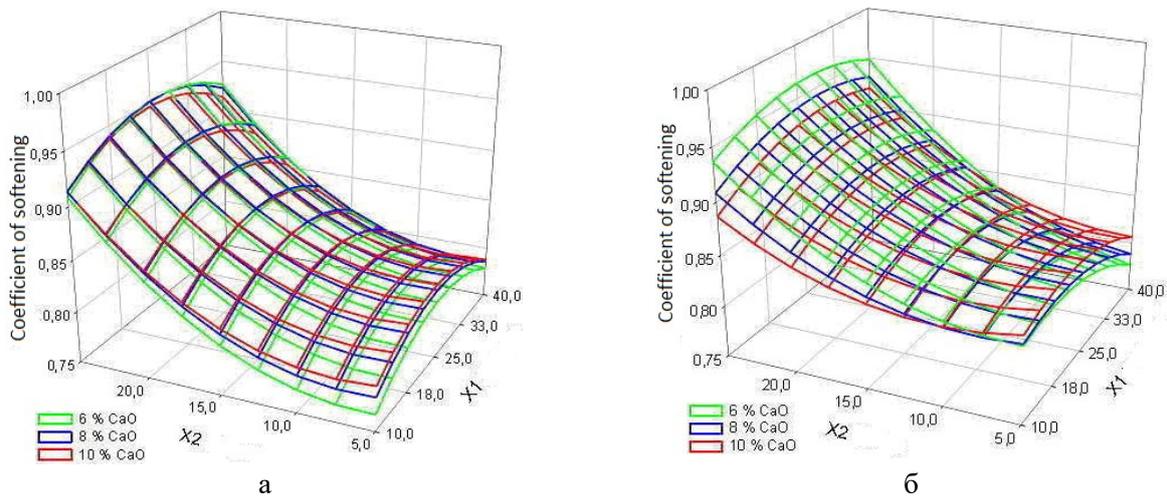
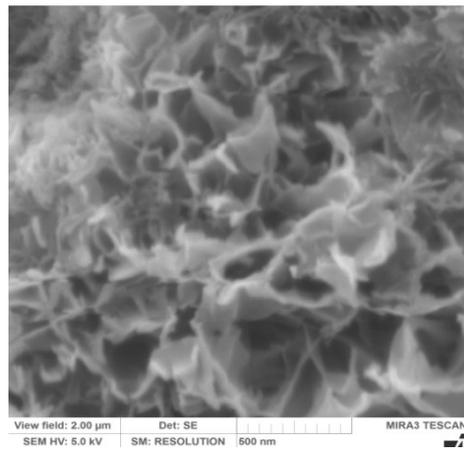
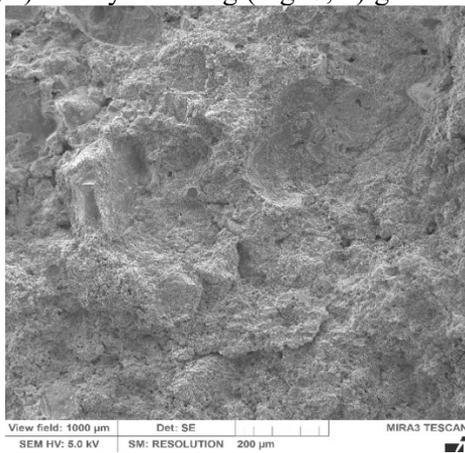


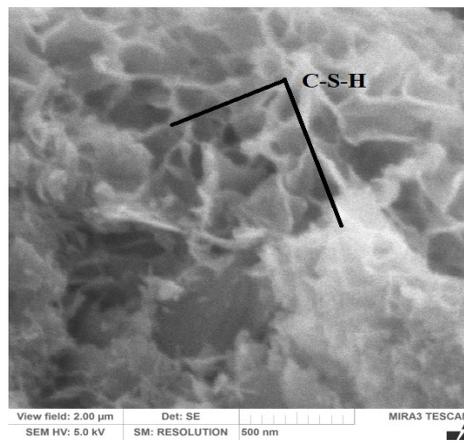
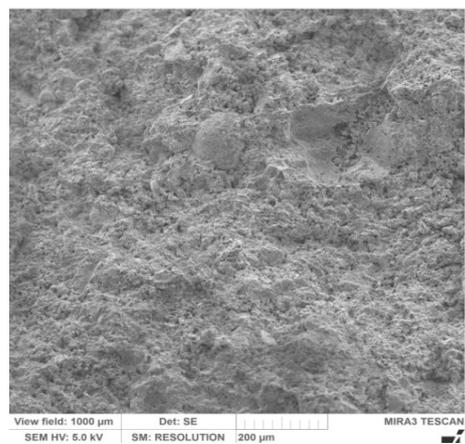
Fig. 6. Dependence of coefficient of softening on loam, volcanic ash and active CaO contents for autoclave (a) and non-autoclave (b) methods, respectively

Calcium silicate hydrate (CSH) gel is the most important product of binder hydration. During the hydration process, CSH gel can have a fibrillar or acicular, tubular, foil-like, and lace-like shape, varying depending on influencing factors, mainly the calcium-to-silica ratio. CSH synthesized in an autoclave (Fig. 7, a) and by steaming (Fig. 7, b) generally has

a spherical or lamellar shape. The synthesized CSH gel has a porous network structure formed by the layered arrangement of fibrous compounds, which is created at a calcium-to-silica ratio of 1.5 to 2 and is designated as CSH(B). Scanning electron microscopy images show that the samples are compact.



a



б

Fig. 7. Images of SE with a loam content of – 40%, volcanic ash – 25%, CaO – 10%, (a) in an autoclave; (b) in non-autoclave

The comparable compressive strength when using both autoclaved and non-autoclaved methods is

explained by the fact that, while the autoclaved method causes rapid and crystalline hydration, the

non-autoclaved method, thanks to reactive mineral components such as clays and volcanic ash, forms a strong amorphous binding network over time. This optimized reaction in the non-autoclaved process compensates for the typical strength increase expected from high-pressure hardening. Essentially, the specific interactions of the mixtures and the inherent pozzolanic or geopolymer reactivity of the raw materials help both methods achieve similar compressive strength.

Silicate materials with volcanic ash, produced using steam curing, stand out for their environmental friendliness due to the exclusion of the energy-intensive autoclaving process, despite lower compressive strength. The planned autoclave mixture provides a good balance of strength and durability, while utilizing environmentally friendly raw materials. The final choice depends on the specific performance requirements and environmental priorities of the construction project.

The autoclave method typically requires significant investment in equipment and energy costs associated with high-pressure steam processing. The non-autoclave method, being less technologically complex and effectively utilizing local resources, can provide a lower overall cost structure. Given Eritrea's current economic situation and technological capabilities, it is likely that the non-autoclave method would be more appropriate due to lower initial investment and operating costs.

Conclusions. This study investigated the feasibility of incorporating loams and volcanic ash into the production of silicate materials, under both autoclaved and non-autoclaved conditions. The results showed that both autoclaved and non-autoclaved methods are viable for producing silicate materials using these readily available raw materials. The properties of the resulting silicate materials largely conform to the recommended limits for such building products, indicating their potential for developing cost-effective and durable construction solutions. This research highlights the environmental and economic benefits of utilizing natural resources.

The developed materials have been shown to possess high strength and water resistance, which is a crucial property for various applications. Specifically, samples treated under autoclaved conditions achieved a compressive strength of up to 23 MPa, while samples treated without autoclaving still reached a significant strength of 20 MPa. The results demonstrated that non-autoclave technology, utilizing these readily available materials, can provide acceptable compressive strength and water resistance, making it a technically and economically feasible solution for the construction of residential and public buildings, even in humid climates.

It has been established that loam and volcanic ash actively interact with lime during hydrothermal treatment, both in autoclave and non-autoclave conditions, forming poorly crystallized calcium hydro-silicates (CSH(B)). Future research can focus on optimizing mixture compositions for specific applications, conducting long-term durability assessments, and studying the scalability of these production methods for industrial implementation.

In Eritrea, where cost and environmental impact are paramount, non-autoclaved technology presents an attractive solution. Its lower production cost, good water resistance, and significantly reduced environmental footprint make it a highly viable and sustainable option, despite slightly lower strength. Further research could focus on optimizing the non-autoclaved mix to enhance its strength without substantially increasing cost or environmental impact.

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

REFERENCES

1. Rowe R.K., Skinner G.D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation. *Geotextiles and geomembranes*. 2001. Vol. 19(7). Pp. 387–412. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00014-0
2. Salim R.W., Ndambuki J.M., Adedokun D.A. Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugarcane bagasse ash. *Sustainability*. 2014. Vol. 6. (6). Pp. 3686–3696. DOI: 10.3390/su6063686
3. Schicker A., Gier S. Optimizing the mechanical strength of adobe bricks. *Clays and clay minerals*. 2009. Vol. 57(4). Pp. 494–501. DOI: 10.1346/CCMN.2009.0570410
4. Salim R.W., Ndambuki J.M., Adedokun D.A. Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugarcane bagasse ash. *Sustainability*. 2014. Vol. 6(6). Pp. 3686–3696. DOI: 10.3390/su6063686
5. Derby N.E., Knighton R.E., Montgomery B.R. Construction and performance of large soil core lysimeters. *Soil Science Society of America Journal*. 2002. Vol. 66(5). Pp. 1446–1453. DOI: 10.2136/sssaj2002.1446
6. Doaa M., Ashmawi A.E. Effect of Feldspar, compost and biochar on cultivating Cowpea (*Vigna unguiculata* ssp. *unguiculata*) plant and soil sandy clay loam properties. *Asian Soil Res. J.* 2022. Vol. 6. Pp. 42–57. DOI: 10.9734/ASRJ/2022/v6i130123
7. Monsif M., Zerouale A., Kandri N.I., Mozzon M., Sgarbossa P., Zorzi F., Tateo F., Tamburini S.,

Franceschinis E., S. Carturan S., Bertani R. Chemical-physical and mineralogical characterization of ceramic raw materials from Moroccan northern regions: Intriguing resources for industrial applications. *Applied Clay Science*. 2019. Vol. 182. 105274. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105274

8. Bentz J.L., Peterson R.C. Authigenic phyllosilicates in sand layers from the mudflats of saline lakes in the northern great Prairies, Saskatchewan. *The Canadian Mineralogist*. 2022. Vol. 60(1). Pp. 101–120. DOI: 10.3749/canmin.1900065

9. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Silicate autoclave materials using nanodispersed raw materials [Silikatnye avtoklavnye materialy s ispol'zovaniem nanodispersnogo syr'ya]. *Building materials*. 2008. No. 11. Pp. 42–44. (rus)

10. Volodchenko A.N., Lesovik V.S. Improving the efficiency of autoclave materials production [Povyshenie effektivnosti proizvodstva avtoklavnykh materialov]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2008. No. 9. Pp. 10–16. (rus)

11. Volodchenko A.N. Influence of clay minerals on the properties of autoclave silicate materials [Vliyaniye glinistykh mineralov na svoystva avtoklavnykh silikatnykh materialov]. *Innovations in science*. 2013. No. 21. Pp. 23–28. (rus)

12. Volodchenko A.A. Wall silicate materials of non-autoclave hardening with the use of siliceous raw materials and aluminosilicate binder based on unconventional clay rocks [Stenovye silikatnye materialy neavtoklavnogo tverdeniya s primeneniem kremnezemistogo syr'ya i alyumosilikatnogo vyazhushchego na osnove netraditsionnykh glinistykh porod]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. №. 11. Pp. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-25-34 (rus)

13. Kim J., Kim D. Classification of inorganic natural fine-grained soils in Korea based on modified plasticity chart. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2018. Vol. 36(5). Pp. 579–588. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1354101

14. Priyadharshini P., Ramamurthy K., Robinson R.G. Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar. *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 146. Pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.clay.2017.05.038

15. Lingling X., Wei G., Tao W., Nanru Y. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio. *Construction and building materials*. 2005. Vol. 19(3). Pp. 243–247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017

16. Cobîrzan N., Thalmaier G, Anca-Andreea Balog A-A, Constantinescu H. Volcanic tuff as secondary raw material in the production of clay bricks. *Materials*. 2021. Vol. 14(22). 6872. DOI: 10.3390/ma14226872

17. Knight J.C. Influence of volcanic ash as flux on ceramic properties of low plasticity clay and high plasticity clay of Trinidad. *British ceramic transactions*. 1999. Vol. 98(1). Pp. 24–28. DOI: 10.1179/bct.1999.98.1.24

18. Serra M. F., Conconi M.S., Suarez G., Aglietti E.F., Rendtorff N.M. Volcanic ash as flux in clay based triaxial ceramic materials, effect of the firing temperature in phases and mechanical properties. *Ceramics international*. 2015. Vol. 41(5). Pp. 6169–6177. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.12.123

19. Zhang P., Huang J., Shen Z., Wang X, Luo F, Zhang P, Wang J, Miao S. Fired hollow clay bricks manufactured from black cotton soils and natural pozzolans in Kenya. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 141. Pp. 435–441. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.018

20. Candamano S. De Luka P., Garofalo P., Crea F. Ceramic Materials Containing Volcanic Ash and Characterized by Photoluminescent Activity. *Environments*. 2023. Vol. 10(10). 172. DOI: 10.3390/environments10100172

21. Basquioto de Souza F., Sagoe-Crentsil K., Duan W. A century of research on calcium silicate hydrate (C–S–H): Leaping from structural characterization to nanoengineering. *Journal of the American Ceramic Society*. 2022. Vol. 105(5). Pp. 3081–3099. DOI: 10.1111/jace.18304

22. Ghebremedhin K.V., Volodchenko A.N. Aluminosilicate raw materials of the State of Eritrea for the production of silicate materials. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 2. Vol. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23. (rus)

Information about the authors

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

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

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

Поступила 04.01.2026 г.

© Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., Шаповалов Н.А., 2026

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kidanebab100@gmail.com.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ГЛИНЫ И ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА

Аннотация. Представлены результаты исследований по использованию глины месторождения Дэбуб и вулканического пепла в производстве силикатных материалов в автоклавных и безавтоклавных условиях. Рациональная смесь в автоклавных условиях обеспечивает прочность на сжатие 22,75 МПа, среднюю плотность 1955 кг/м³ и водопоглощение 6,31 % при содержании 10 мас. % суглинка, 25 мас. % вулканического пепла и активности смеси 6 %. Неавтоклавный метод обеспечил прочность на сжатие 20,14 МПа при 40 мас. % суглинка, 25 мас. % вулканического пепла и активности смеси 6 %. Соответствующие средняя плотность, водопоглощение и коэффициент размягчения составили 1926 кг/м³, 8,58 % и 0,91 соответственно. Прочностные показатели неавтоклавных образцов несколько ниже, чем у автоклавного способа производства, однако находятся в пределах рекомендуемых значений для силикатных изделий. Установлено, что породообразующие минералы глины и вулканический пепел активно взаимодействуют с известью во время гидротермической обработки как при автоклавировании, так и при пропарке, образуя мелко- и крупнокристаллические новообразования, обеспечивающие высокую прочность силикатным материалам. В Государстве Эритрея, где стоимость и воздействие на окружающую среду имеют первостепенное значение, автоклавная и, особенно, неавтоклавная технология представляет собой оптимальное решение при производстве строительных материалов.

Ключевые слова: суглинок месторождения Дэбуб, вулканический пепел, автоклавная и неавтоклавная технология, силикатные материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rowe R.K., Skinner G.D. Numerical analysis of geosynthetic reinforced retaining wall constructed on a layered soil foundation // *Geotextiles and geomembranes*. 2001. Vol. 19(7). Pp. 387–412. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00014-0

2. Salim R.W., Ndambuki J.M., Adedokun D.A. Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugercane bagasse ash // *Sustainability*. 2014. Vol. 6. (6). Pp. 3686–3696. DOI: 10.3390/su6063686

3. Schicker A., Gier S. Optimizing the mechanical strength of adobe bricks // *Clays and clay minerals*. 2009. Vol. 57(4). Pp. 494–501. DOI: 10.1346/CCMN.2009.0570410

4. Salim R.W., Ndambuki J.M., Adedokun D.A. Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugercane bagasse ash // *Sustainability*. 2014. Vol. 6(6). Pp. 3686–3696. DOI: 10.3390/su6063686

5. Derby N.E., Knighton R.E., Montgomery B.R. Construction and performance of large soil core lysimeters // *Soil Science Society of America Journal*. 2002. Vol. 66(5). Pp. 1446–1453. DOI: 10.2136/sssaj2002.1446

6. Doaa M., Ashmawi A.E. Effect of Feldspar, compost and biochar on cultivating Cowpea (*Vigna*

unguiculata ssp. unguiculata) plant and soil sandy clay loam properties // *Asian Soil Res. J.* 2022. Vol. 6. Pp. 42–57. DOI: 10.9734/ASRJ/2022/v6i130123

7. Monsif M., Zerouale A., Kandri N.I., Mozzon M., Sgarbossa P., Zorzi F., Tateo F., Tamburini S., Franceschinis E., S. Carturan S., Bertani R. Chemical-physical and mineralogical characterization of ceramic raw materials from Moroccan northern regions: Intriguing resources for industrial applications // *Applied Clay Science*. 2019. Vol. 182. 105274. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105274

8. Bentz J.L., Peterson R.C. Authigenic phyllosilicates in sand layers from the mudflats of saline lakes in the northern great Prairies, Saskatchewan // *The Canadian Mineralogist*. 2022. Vol. 60(1). Pp. 101–120. DOI: 10.3749/canmin.1900065

9. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Силикатные автоклавные материалы с использованием нанодисперсного сырья // *Строительные материалы*. 2008. №. 11. Pp. 42–44.

10. Володченко А.Н., Лесовик В.С. Повышение эффективности производства автоклавных материалов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2008. №. 9. Pp. 10–16.

11. Володченко А.Н. Влияние глинистых минералов на свойства автоклавных силикатных материалов // *Инновации в науке*. 2013. №. 21. Pp. 23–28.

12. Володченко А.А. Стеновые силикатные материалы неавтоклавного твердения с применением кремнеземистого сырья и алюмосиликатного вяжущего на основе нетрадиционных глинистых пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №. 11. Pp. 25–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-25-34

13. Kim J., Kim D. Classification of inorganic natural fine-grained soils in Korea based on modified plasticity chart // Marine Georesources & Geotechnology. 2018. Vol. 36(5). Pp. 579–588. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1354101

14. Priyadharshini P., Ramamurthy K., Robinson R.G. Excavated soil waste as fine aggregate in fly ash based geopolymer mortar // Applied Clay Science. 2017. Vol. 146. Pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.clay.2017.05.038

15. Lingling X., Wei G., Tao W., Nanru Y. Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio // Construction and building materials. 2005. Vol. 19. №. 3. Pp. 243–247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.017

16. Cobîrzan N., Thalmaier G, Anca-Andreea Balog A-A, Constantinescu H. Volcanic tuff as secondary raw material in the production of clay bricks // Materials. 2021. Vol. 14(22). 6872. DOI: 10.3390/ma14226872

17. Knight J. C. Influence of volcanic ash as flux on ceramic properties of low plasticity clay and high plasticity clay of Trinidad // British ceramic

transactions. 1999. Vol. 98(1). Pp. 24–28. DOI: 10.1179/bct.1999.98.1.24

18. Serra M. F., Conconi M.S., Suarez G., Aglietti E.F., Rendtorff N.M. Volcanic ash as flux in clay based triaxial ceramic materials, effect of the firing temperature in phases and mechanical properties // Ceramics international. 2015. Vol. 41(5). Pp. 6169–6177. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.12.123

19. Zhang P., Huang J., Shen Z., Wang X, Luo F, Zhang P, Wang J, Miao S. Fired hollow clay bricks manufactured from black cotton soils and natural pozzolans in Kenya // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 141. Pp. 435–441. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.018

20. Candamano S. De Luka P., Garofalo P., Crea F. Ceramic Materials Containing Volcanic Ash and Characterized by Photoluminescent Activity // Environments. 2023. Vol. 10(10). 172. DOI: 10.3390/environments10100172

21. Basquiroto de Souza F., Sagoe-Crentsil K., Duan W. A century of research on calcium silicate hydrate (C–S–H): Leaping from structural characterization to nanoengineering // Journal of the American Ceramic Society. 2022. Vol. 105(5). Pp. 3081–3099. DOI: 10.1111/jace.18304

22. Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н. Алюмосиликатное сырье государства Эритрея для производства силикатных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

Информация об авторах

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

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

Шаповалов Николай Афанасьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Received 04.01.2026

Для цитирования:

Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., Шаповалов Н.А. Влияние способа гидротермальной обработки на эксплуатационные характеристики силикатных материалов на основе глины и вулканического пепла. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-8-20

For citation:

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N., Shapovalov N.A. The effect of the hydrothermal treatment method on operational characteristics of silicate materials based on clay and volcanic ash. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-8-19

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29

Тамов М.М.

Кубанский государственный технологический университет

E-mail: murat.tamov@gmail.com

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ БАЛОК С КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ

Аннотация. Изложены результаты комплексных численных и экспериментальных исследований работы наклонных сечений железобетонных балок с композитным поперечным армированием. Предложена методика конечно-элементных расчетов балок в ПК Abaqus FEA, учитывающая фактические физико-механические свойства материалов, в т.ч. нелинейное поведение бетона, характеризующее моделью пластического деформирования с накоплением повреждений CDP. Сопоставлением расчетных данных с результатами испытаний авторов и других исследователей подтверждена высокая точность разработанных численных моделей для балок как со стальной, так и с композитной поперечной арматурой: вычисленные величины прогибов и несущей способности балок хорошо согласуются с опытными. В моделях для случаев разрушения балок вследствие разрыва хомутов учитывали ортотропность композитной арматуры и фактические траектории наклонных трещин. Установлено, что из-за неравномерного распределения нормальных напряжений, вызванного локальным изгибом в зоне пересечения с наклонными трещинами, прочность композитных стержней может снижаться до 80 % от их сопротивления при осевом растяжении. Разработанная методика моделирования позволяет достоверно оценивать несущую способность и деформативность балок со стальным и композитным поперечным армированием и может быть рекомендована для практического применения при расчетах балок на поперечную силу.

Ключевые слова: железобетонные балки, композитная арматура, нелинейный расчет, поперечная сила.

Введение. Композитная арматура (АКП) – современный строительный материал, изготавливаемый на основе стеклянных, базальтовых или углеродных волокон, пропитанных полимерной матрицей. В сравнении с традиционной стальной арматурой АКП обладает высокой коррозионной стойкостью, малой объемной массой и диэлектрическими свойствами, что делает ее востребованной при строительстве в агрессивных средах и на объектах с повышенными требованиями к долговечности конструкций. Применение АКП в железобетонных конструкциях требует учета ее анизотропности и пониженного модуля упругости по сравнению со сталью [1].

Большинство исследований бетонных балок с АКП посвящены прочности, трещиностойкости и деформативности их нормальных сечениях [2–5]. Работы, рассматривающие применение АКП для поперечного армирования, немногочисленны. Особенности восприятия поперечных сил прямоугольными балками с композитным армированием наклонных сечений изучались в работах [6–10], двутавровых и тавровых балок – в [11, 12]. Характер работы наклонных сечений с АКП определяется рядом факторов: сниженной прочностью изогнутых участков хомутов, низким модулем упругости АКП, отсутствием физического предела текучести и слабым нагельным эффектом [13, 14].

На участках загиба хомуты подвержены одновременному действию растягивающих напряжений вдоль волокон, поперечных напряжений со стороны охваченного хомутами бетона и напряжений сцепления с бетоном. Это снижает прочность криволинейных участков АКП по сравнению с прямыми. В [15–18] прочность в этих зонах составила 30–50 % от прочности прямых участков, при этом прочность снижается с ростом кривизны стержня.

Силы зацепления, действующие вдоль наклонных трещин, снижаются при использовании АКП из-за большей ширины раскрытия трещин и значительных деформаций хомутов. Действие сил зацепления возможно при деформациях поперечной арматуры до 0,4 % [18], в то время как деформации композитных хомутов зачастую превышают 1 %.

Раскрытие наклонных трещин сопровождается сдвигом, вызывающим локальные изгибные усилия в хомутах. Из-за ориентированного расположения волокон АКП эти усилия могут вызывать преждевременный разрыв хомутов в зоне пересечения трещиной [12]. В [14] испытаниями специальных образцов установлено, что минимальная прочность АКП при диагональном пересечении трещиной составляет около 65 % прочности вдоль волокон, без выявленной зависимости прочности от величины угла между стержнем и трещиной.

Разрушение балок со стальными хомутами наступает вследствие раздробления или разрыва (среза) бетона над вершиной наклонной трещины. В свою очередь, разрушение балок с поперечным композитным армированием помимо описанной формы [19] может также происходить и в результате разрыва хомутов [12, 20].

В настоящей статье приведены результаты комплексных экспериментальных и численных исследований сопротивления наклонных сечений железобетонных балок с композитным поперечным армированием. Задачи работы включали расчетную оценку напряженно-деформированного состояния АКП в месте пересечения с наклонными трещинами, построение нелинейных конечно-элементных моделей для расчета сопротивления балок поперечным силам, проведение испытаний специальных образцов АКП и балок с композитным армированием наклонных сечений, оценка точности моделей сопоставление теоретических и опытных результатов.

Материалы и методы. Построение конечно-элементных моделей балок выполнено в

программном комплексе Abaqus FEA, обладающем для железобетонных конструкций развитым функционалом свойств материалов, возможностью моделирования нелинейного поведения конструкций, создания сечений сложной геометрии, наглядной визуализации результатов расчета (деформаций, трещин, разрушения). Все компоненты предлагаемых конечно-элементных моделей – бетон, арматура и опоры балок – заданы в виде трехмерных деформируемых твердых тел (рис. 1). Нагружение осуществляли по принятой при испытаниях схеме. Опорным элементам были заданы граничные условия, соответствующие принятым в экспериментальных исследованиях. Нагружение моделей осуществляли через вспомогательный элемент заданием ему вертикальных перемещений. Взаимодействие арматуры и бетона обеспечивалось наложением связи «встраиваемый элемент». Между вспомогательными опорными элементами и бетоном была назначена жесткая связь «поверхность – поверхность» [21].

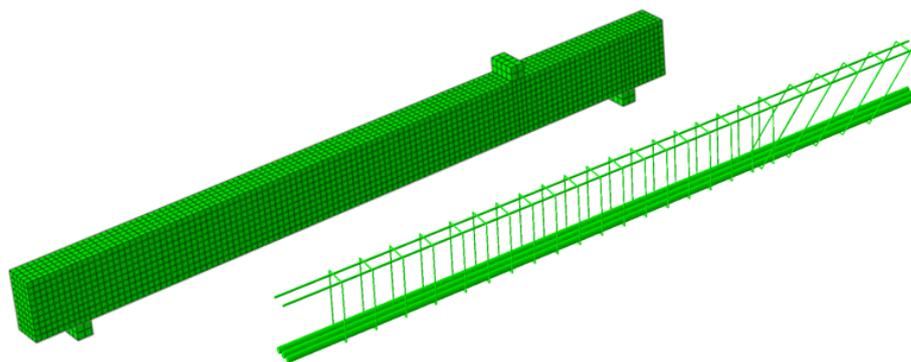


Рис. 1. Пример общего вида модели балки и арматурного каркаса

При моделировании случаев с раздроблением бетона сжатой зоны стальную и композитную арматуру задавали стержневыми упругими элементами. В моделях для случаев разрушения балок с разрывом композитных хомутов по наклонной трещине учитывали различие деформативных свойств АКП в разных направлениях. Для этого в Abaqus FEA были использованы объемные конечные элементы с типом задания параметров материала «инженерные константы» [21], позволяющим назначать различные значения модуля упругости в трех направлениях. Модуль упругости АКП в направлении волокон принимали по результатам испытаний на осевое растяжение, в двух оставшихся направлениях – по данным [12].

Бетон описывали моделью пластического деформирования с накоплением повреждений (Concrete Damage Plasticity или CDP) с модифицированной поверхностью текучести Друкера –

Прагера. Развитие поверхности текучести определяется эквивалентными пластическими деформациями при растяжении и сжатии. Потенциал пластического течения и поверхность текучести записывают с помощью двух инвариантов тензора напряжений – гидростатических напряжений и девиаторной части [22]. В качестве зависимости «напряжения-деформации» при сжатии принята диаграмма деформирования ЕКБ-ФИБ, при растяжении – усредненная кусочно-линейная диаграмма по [23]. Параметрические точки диаграмм деформирования назначали согласно опытным данным. Величины других параметров модели CDP – эксцентриситета ϵ , параметра вязкости μ , отношения второго инварианта напряжений на растягивающем меридиане K_c , отношения напряжений σ_{b0} и σ_{c0} , угла дилатансии ψ – оставляли назначенными программой по умолчанию.

Уровень напряжений в конечных элементах, реализующих поведение бетона, характеризуется коэффициентами повреждения [24] при растяжении $d_t = 1 - \frac{\sigma_{bt}}{\sigma_{btpk}}$ и сжатии $d_c = 1 - \frac{\sigma_b}{R_b}$ [25]. Коэффициенты d_c и d_t активируются при достижении сжимающими и растягивающими напряжениями вершин соответствующих диаграмм деформирования бетона. Расчеты по составленной модели позволяли получить графики роста прогибов балок, картины трещинообразования на различных этапах нагружения, изополя напряжений в арматуре и бетоне.

Проверку точности предложенных конечно-элементных моделей осуществляли сравнением с результатами собственных и чужих испытаний балок. Программа экспериментальных исследований авторов (табл. 1) включала 8 испытаний

балок сечением 100x200 мм (рис. 2, а), армированных в приопорных зонах стальными (эталонные образцы) и композитными (опытные образцы) хомутами (рис. 2, б). Для измерения деформаций хомутов по ожидаемой траектории образования критической наклонной трещины на них были наклеены тензорезисторы (рис. 2, в).

Хомуты эталонных балок были изготовлены из проволоки Вр-1 диаметром 5 мм, опытных балок – из базальтопластиковой арматуры диаметром 4 мм. Базальтопластиковые хомуты были изготовлены ООО «НЗК» (г. Новосибирск) из одной партии арматуры по чертежам автора. Угол наклона хомутов в соответствии с задачами исследования принимали равным 45 и 90°. Продольная арматура как эталонных, так и опытных балок состояла из трех стержней А400 диаметром 18 мм. Для испытания всех балок был принят единый пролет среза $a/h_0 = 2,5$.

Таблица 1

План экспериментальных исследований

№ балки	Шифр пролета среза	Хомуты	α , град.	μ_{iw} , %
1	О1-В-К-80	Ø4 АБК	90	0,31
	О2-В-К-100	Ø4 АБК	90	0,25
2	О3-Н-К-60	Ø4 АБК	45	0,42
	О4-Н-К-75	Ø4 АБК	45	0,34
3	О5-В-В-80	Ø5 Вр-1	90	0,47
	О6-В-В-100	Ø5 Вр-1	90	0,38
4	О7-Н-В-60	Ø5 Вр-1	45	0,63
	О8-Н-В-75	Ø5 Вр-1	45	0,50

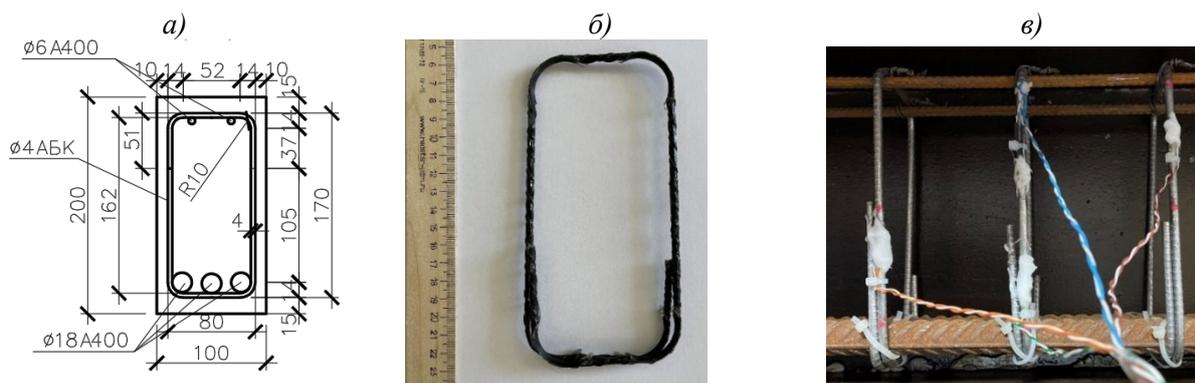


Рис. 2. Армирование опытных образцов:

а) поперечное сечение балок; б) хомут из АБК; в) тензорезисторы на хомутах

Конечно-элементные модели по принятой методике составлены также для балок из опытов М.А. Иссы [26], С. Вивекананда и А. Сумати [27], Курта М. К [12] и Усанова С.В. [28].

Основная часть. Полученные для наших образцов графики деформирования балок хорошо согласуются с экспериментальными на

всех стадиях нагружения. На рис. 3 показан пример совмещения опытных и расчетных графиков прогибов. Из полученных изополей параметра dc следует, что разрушение балок в моделировании, как и в опытах, наступило от раздробления бетона над вершиной наклонной трещины вблизи точки приложения нагрузки (рис. 4).

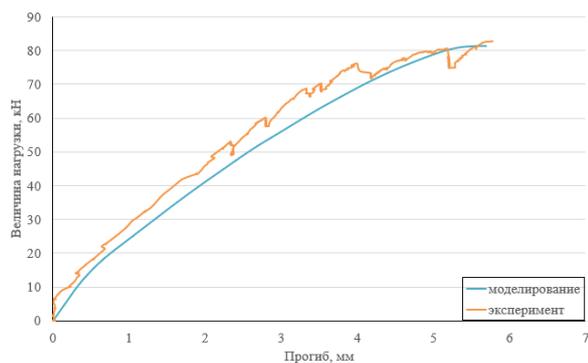


Рис. 3. Расчетные и опытные графики прогибов для балки ОЗ-Н-К-60

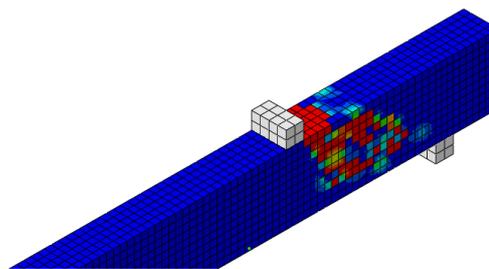


Рис. 4. Область разрушения сжатого бетона балки О2-В-К-100

Опытные (Q_{exp}) и теоретические значения прочности наклонных сечений наших балок, вычисленные по предложенной методике конечно-элементного моделирования (Q_{Abaq}) и по формулам СП 295.1325800 ($Q_{СП}$), приведены в табл. 2. Результаты расчета балок со стальными хомутами (образцы 3 и 4) по формулам СП оказались близки к опытным разрушающим нагрузкам. Среднее значение отношения $Q_{exp} / Q_{СП}$ составляет 0,98 при коэффициенте вариации 8,3 %. При этом формулы норм существенно переоцени-

вают несущую способность балок с композитным поперечным армированием – отношение $Q_{exp} / Q_{СП}$ для них равно 0,57. Более точными получились вычисления предложенными нелинейными конечно-элементными моделями. Они недооценивают опытные величины разрушающих поперечных сил на 6%, что следует считать удовлетворительным, принимая во внимание способность модели производить вычисления для балок как со стальными, так и с композитными хомутами.

Таблица 2

Сравнение расчетных и опытных значений разрушающих поперечных сил

Шифр образца		Q_{exp} , кН	$Q_{СП}$, кН	Q_{Abaq} , кН	$Q_{exp} / Q_{СП}$	Q_{exp} / Q_{Abaq}
1	О1-В-К-80	93,26	166,33	90,58	0,56	1,03
	О2-В-К-100	83,6	138,53	70,47	0,60	1,19
2	О3-Н-К-60	82,8	166,33	81,38	0,50	1,02
	О4-Н-К-75	83,79	138,53	71,62	0,60	1,17
3	О5-В-В-80	105,975	108,51	107,25	0,98	0,99
	О6-В-В-100	81,675	92,68	77,56	0,88	1,05
4	О7-Н-В-60	109,137	110,71	101,43	0,99	1,08
	О8-Н-В-75	102,91	94,88	106,25	1,08	0,97

В исследовании М.А. Иссы [26] испытаны балки прямоугольного сечения с композитным продольным и поперечным армированием стержнями АБК и без поперечной арматуры. Варьируемыми параметрами в исследовании являлись коэффициент продольного армирования, сечение балок и пролет среза. В работе С. Вивеканандам и А. Сумати [27] рассмотрено поведение балок прямоугольного сечения при разных сочетаниях классов бетона, стального и стеклопластикового продольного и поперечного армирования.

В результате моделирования балок [26, 27] получены зоны с образованием наклонных трещин (рис. 5, а и б, а), участки раздробления бетона, а также близкие к опытным расчетные графики зависимости прогибов от величины прило-

женной силы (рис. 5, б и б, б). Полученные графики деформирования балок хорошо согласуется с экспериментальным на всех стадиях нагружения. Разрушение моделей балок, как и при испытаниях, наступило в результате раздробления бетона над наклонной трещиной.

Численный анализ случаев с разрывом композитных стержней в зоне их пересечения наклонной трещиной включал моделирование трех балок, при испытании которых была получена эта форма разрушения: нашей балки О1-В-К-80, двутавровых балок Б17 из работы Усанова С.В. [1] и S4АН-0.8-7 из работы Курта М.К. [12].

В работе [28] исследовано поведение двутавровых железобетонных балок с композитным и стальным поперечным армированием при разных пролетах среза. Балка Б17, разрушившаяся в результате разрыва поперечной арматуры, имела

высоту сечения 280 мм, ширину полок 200 мм и толщину стенки 30 мм. Поперечное армирование

было выполнено одиночными базальтопластиковыми стержнями диаметром 4 мм с шагом 105 мм.

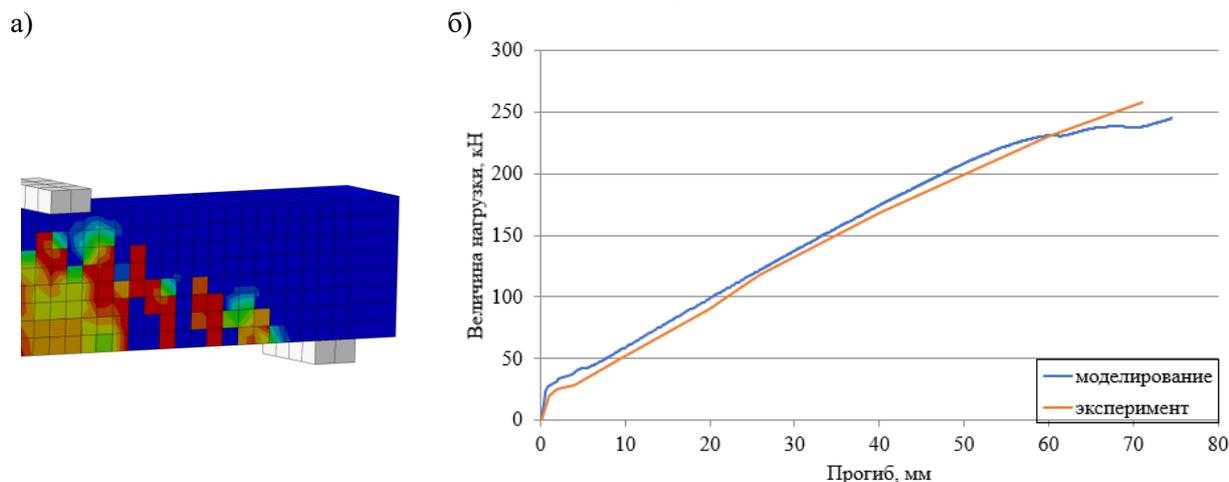


Рис. 5. Результаты расчета балки 3-16B2 [27]: а) зона образования трещин в пролете среза; б) расчетный и опытный графики прогибов

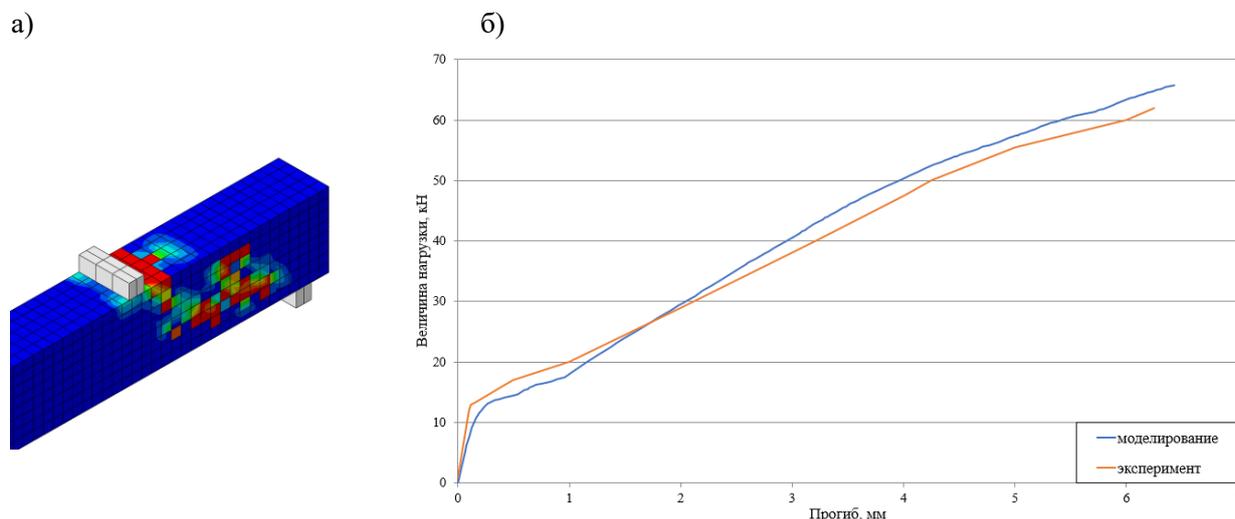


Рис. 6. Результаты расчета балки M25-GS [28]: а) область разрушения сжатой зоны балки; б) расчетный и опытный графики прогибов

Высота сечения, ширина полок и толщина стенки балки S4AH-0.8-7 из работы [12] составляли соответственно 650, 400 и 100 мм. Поперечное армирование балки в приопорной зоне состояло из спаренных стеклопластиковых стержней диаметром 12 мм, расставленных с шагом 300 мм. Нагружение балки осуществлялось с относительным пролетом среза $a/h_0 = 3,6$.

При составлении моделей балок создавали искусственную наклонную трещину (разделение конечных элементов) с траекторией и длиной, аналогичной трещине, по которой разорвались композитные стержни при испытаниях (рис. 7). НДС композитных хомутов анализировали, приложив к моделям балок нагрузку, при которой происходило разрушение балок при испытаниях.

Оригинальность подхода заключается в моделировании стержней объемными элементами с анизотропными деформативными свойствами. Расчетное НДС, возникающее в хомутах, демонстрирует способность модели имитировать локальный изгиб стержня в месте пересечения с наклонной трещиной (рис. 7). Нормальные напряжения в поперечном сечении стержня распределены на этом участке неравномерно. Так, в модели балки O1-B-K-80 крайевые напряжения в стержне в месте изгиба равны примерно 883 МПа, в то время как в середине сечения значения стержня – около 650 МПа (рис. 7). Таким образом, разница между максимальными и средними напряжениями составила 26%. Аналогичная картина получена при моделировании других балок.

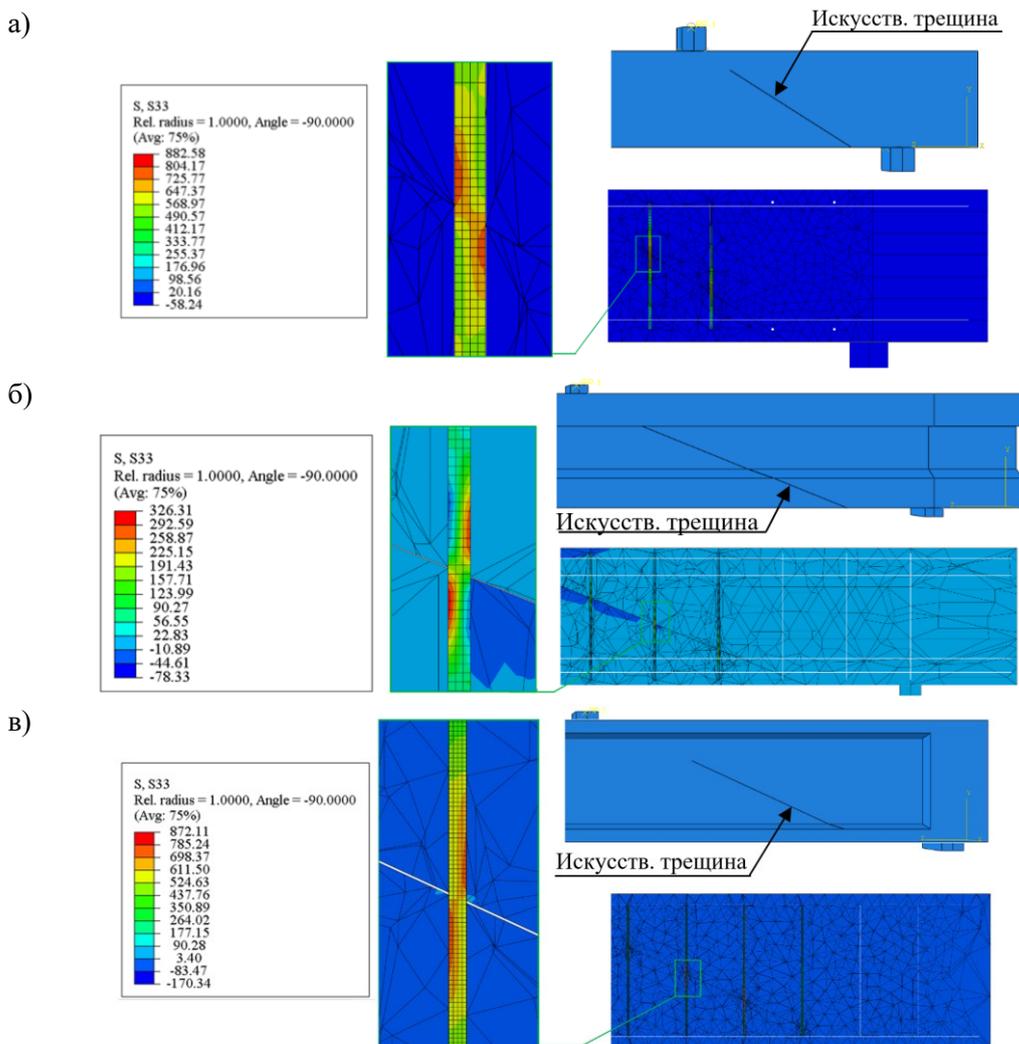


Рис. 7. Моделирование напряжений стержнях поперечного армирования:
 а) балки О1-В-К-80; б) балки Б17 [28]; в) балки S4AH-0.8-7 [12]

В табл. 3 сведены значения временного сопротивления АКП, использованной в опытах для хомутов, и полученные конечно-элементными расчетами значения максимальных напряжений в них. Во всех случаях разрыв хомутов произошёл при напряжениях, не достигающих сопротивления АКП, что можно объяснить снижением прочности стержней в результате их локального изгиба по наклонной трещине. При этом разница

между значениями этих напряжений оказалась в достаточно узком диапазоне 15–17%. Исходя из этого, можно рекомендовать ограничение напряжений в хомутах при моделировании 80% от прочности АКП при осевом растяжении. Определяющим это ограничение может стать в тех случаях, когда загиб хомутов будет выполнен с достаточно большим радиусом, исключая разрушение на гнущем участке.

Таблица 3

Результаты моделирования АКП в пересечении с наклонной трещиной

Источник	Наименование балки	Временное сопротивление при осевом растяжении, МПа	Максимальные расчетные напряжения в хомутах, МПа	Разница напряжений, %
Опыты авторов	О1-В-К-80	1049	883	16
[12]	S4AH-0.8-7	382	326	15
[28]	Б17	1049	872	17

Выводы. Предложена методика конечно-элементного моделирования сопротивления наклонных сечений балок с композитным поперечным армированием. Задача решена в нели-

нейной пространственной постановке с применением модели пластического деформирования бетона с накоплением повреждений (CDP). В случаях разрыва стержней учтены ортотропные

свойства композитной арматуры и реальные траектории наклонных трещин. Подтверждена высокая точность разработанных численных моделей: расчетные значения несущей способности и графики развития прогибов хорошо согласуются с результатами испытаний как авторских, так и представленных в литературе образцов. Моделирование напряженно-деформированного состояния композитных стержней в зоне пересечения с трещинами достоверно отражает распределение нормальных напряжений, объясняющее снижение прочности арматуры по сравнению с осевым растяжением. Показано, что разрыв хомутов происходит при напряжениях, составляющих около 80 % от прочности композитной арматуры. Разработанная методика может послужить эффективным инструментом для расчетов по прочности и прогибам балок с поперечным композитным армированием. Кроме того, предложенные численные модели в сочетании с физическими могут служить инструментом анализа НДС наклонных сечений с композитным армированием для сближения результатов расчета с результатами экспериментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамов М.М., Руденко О.В., Усанов С.В. Нелинейная конечно-элементная модель для расчета прочности стенки двутавровых балок с композитным поперечным армированием // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 1. С. 10–16.
2. Megahed K. Predicting flexural strength of hybrid FRP-steel reinforced beams using symbolic regression and ML techniques // Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-05775-7.
3. Wei B., He X., Zhou M., Wang H., He J. Experimental study on flexural behaviors of FRP and steel bars hybrid reinforced concrete beams // Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm. 2023.e02759.
4. Мирсаяпов И.Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомолекулярной полимерной композитной арматуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 3, № 65. С. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145.
5. Польской П.П., Хишмах М., Ахмад М. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжелого бетона // Инженерный вестник Дона. 2012. №4. С. 35–37. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/doc/polskoy_mervat_mihoub.doc_1304.doc.
6. Меркулов С.И., Есипов С.М. Армирование бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами // Эксперт: теория и практика. 2025. Т. 1, № 28. С. 145–149. DOI: 10.51608/26867818_2025_1_145.
7. Abed F., Ahmed E.R., Abdalla S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams // Journal of The Institution of Structural Engineers. 2019. Vol. 20. Pp. 689–701. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.019.
8. Bywalski C., Drzazga M., Kaźmierowski M., Kamiński M. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with A New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study // Wroclaw University of Science and Technology. 2020. Vol. 13 (5). DOI: 10.3390/ma13051159.
9. Krall M., Polak M.A. Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement // Engineering Structures. 2019. Vol. 198(5). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109333.
10. Han S., Fan C., Zhou A., Ou J. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups // Engineering Structures. 2023. Vol. 278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115520.
11. Ahmed E.A. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a Fiber Reinforced Polymer (FRP) Stirrups // The University of Sherbrooke. Canada, 2009. 291 Pp.
12. Kurth M., Hegger J. Shear resistance of concrete members with fibre reinforced polymers (FRP) – Experimental investigations // Bauingenieur. 2013. Vol. 88. Pp. 393–402.
13. Nanni A., Faza S. Design and construction of concrete reinforced with FRP bars: An emerging technology // ACI Concrete International. 2002. Vol. 24(11). Pp. 53–58.
14. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines // Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. Pp. 859–872. DOI: 10.1139/L00-004.
15. Maruyama K., Zhao W. Flexural and shear behavior of concrete beams reinforced with FRP rods / In: Swamy R. N. (ed.). – Corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield : Sheffield Academic Press, 1994. Pp.1330–1339.
16. Maruyama K., Rizkalla S.H. Shear Design Consideration for Pretensioned Prestressed Beams // ACI Structural Journal. 1988. Vol. 85(5). Pp. 492–498. DOI: 10.14359/2782.
17. Nagasaka T., Fukuyama H., Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups // Fiber-reinforced plastic reinforcement for concrete structures – international symposium. – Detroit: American Concrete Institute, 1993. Pp. 789–812. DOI: 10.14359/4138.

18. MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd ed. New Jersey : Prentice Hall, 1997. 938 pp.
19. Hegger J., Niewels J., Kurth M. Shear analysis of concrete members with fiberreinforced polymers (FRP) as internal reinforcement / In: 9th international symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures FRPRCS-9. 2009.
20. Tomlinson D., Fam A., Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear // Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 19(2). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491.
21. ABAQUS Online Documentation: Version 6.5-1. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch01s02.html> (дата обращения: 09.06.2025).
22. Raza A., Khan Q.U.Z., Ahmad A. Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019(1). DOI:10.1155/2019/1745341.
23. Wahalathantri B.L., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Fawzia S. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS / In: First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University of Technology. Brisbane, 2011. Pp. 260–264.
24. Solhmirzaei R., Kodur V. A Numerical Model for Tracing Structural Response of Ultra-High Performance Concrete Beams // Modelling. 2021. Vol. 2. Pp. 448–466. DOI: 10.3390/modeling2040024.
25. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Saleh M., Jaafar M.S.B., Karimzade K. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete // Structural Engineering International. 2017. Vol. 27(1). Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.
26. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups // Journal of Composites for Construction. 2016. Vol. 20(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638.
27. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars // International Journal of ChemTech Research. 2015. Vol. 8(2). Pp. 635–642.
28. Усанов С.В., Тамов М.М. Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базальтокомпозитной арматуры // Инженерный вестник Дона. 2022. Т. 4, № 88. С. 344–361.

Информация об авторах

Тамов Мурат Мухамедович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций. E-mail: murat.tamov@gmail.com. Кубанский государственный технологический университет. 350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2

Поступила 04.07.2025 г.

© Тамов М.М., 2026

Tamov M.M.

Kuban State Technological University

E-mail: murat.tamov@gmail.com

NUMERICAL MODELS FOR SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH FRP STIRRUPS

Abstract. *This paper presents the results of comprehensive numerical and experimental investigation of shear behavior of reinforced concrete beams with FRP shear reinforcement. A finite element modeling approach is proposed using Abaqus FEA, incorporating the measured physical and mechanical properties of materials, including the nonlinear behavior of concrete represented by the Concrete Damage Plasticity (CDP) model. The accuracy of the developed numerical models is validated through comparison with experimental results obtained by the authors and other researchers. A strong agreement was observed between the calculated and experimental values of beam deflections and load-bearing capacity for beams with both steel and FRP shear reinforcement. For cases involving failure due to stirrup rupture, the models account for the orthotropic properties of FRP reinforcement and the observed trajectories of shear cracks. It was found that, due to non-uniform normal stress distribution induced by local bending in the region of crack-stirrup intersection, the strength of FRP bars may decrease to 80% of their axial tensile strength. The proposed modeling methodology enables reliable assessment of the load-bearing capacity and deformability of beams with both*

steel and FRP shear reinforcement and is recommended for practical application in shear design of reinforced concrete beams.

Keywords: reinforced concrete beams, FRP reinforcement, nonlinear analysis, shear.

REFERENCES

1. Tamov M.M., Rudenko O.V., Usanov S.V. Nonlinear finite element model for calculating the wall strength of I-beams with composite transverse reinforcement [Nelineynaya konechno-elementnaya model' dlya rascheta prochnosti stenki dvutavrovyykh balok s kompozitnym poperechnym armirovaniem]. Scientific Works of the Kuban State Technological University. 2023. No. 1. Pp. 10–16. (rus)
2. Megahed K. Predicting flexural strength of hybrid FRP-steel reinforced beams using symbolic regression and ML techniques. Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-05775-7.
3. Wei B., He X., Zhou M., Wang H., He J. Experimental study on flexural behaviors of FRP and steel bars hybrid reinforced concrete beams. Case Studies in Construction Materials. 2024. Vol. 20. DOI: 10.1016/j.cscm. 2023.e02759.
4. Mirsayapov I.T., Lim V.A., Mirsayapov A. I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement [Otsenka effektivnosti primeneniya vysokomodul'noy polimernoy kompozitnoy armatury]. News KSUAE. 2023. Vol. 3(65). Pp. 145–153. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145. (rus)
5. Polskoy P.P., Khishmakh M., Akhmad M. The effect of fiberglass reinforcement on the strength of normal sections of bending elements made of heavy concrete [O vliyaniy stekloplastikovoy armatury na prochnost' normal'nykh secheniy izgibaemykh elementov iz tyazhelogo betona]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. No. 4. Pp. 35–37. URL: http://ivdon.ru/uploads/article/doc/polskoy_mervat_mihoub.doc_1304.doc. (rus)
6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Reinforcement of concrete and reinforced concrete structures with composite materials [Armirovanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami]. Expert: theory and practice. 2025. Vol. 1(28). Pp. 145–149. DOI: 10.51608/26867818_2025_1_145. (rus)
7. Abed F., Ahmed E.R., Abdalla S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams. Journal of The Institution of Structural Engineers. 2019. Vol. 20. Pp. 689–701. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.019.
8. Bywalski C., Drzazga M., Kaźmierowski M., Kamiński M. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with A New Type of Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement: Experimental Study. Wroclaw University of Science and Technology. 2020. Vol. 13(5). DOI: 10.3390/ma13051159.
9. Krall M., Polak M.A. Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement. Engineering Structures. 2019. Vol. 198, No. 5. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109333.
10. Han S., Fan C., Zhou A., Ou J. Shear behavior of concrete beams reinforced with corrosion-resistant and ductile longitudinal steel-FRP composite bars and FRP stirrups. Engineering Structures. 2023. Vol. 278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115520.
11. Ahmed E.A. Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with a Fiber Reinforced Polymer (FRP) Stirrups. The University of Sherbrooke. Canada, 2009. 291 pp.
12. Kurth M., Hegger J. Shear resistance of concrete members with fibre reinforced polymers (FRP) – Experimental investigations. Bauingenieur. 2013. Vol. 88. Pp. 393–402.
13. Nanni A., Faza S. Design and construction of concrete reinforced with FRP bars: An emerging technology. ACI Concrete International. 2002. Vol. 24, No. 11. Pp. 53–58.
14. Shehata E., Morphy R., Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines. Canadian Journal of Civil Engineering. 2000. Vol. 27. Pp. 859–872. DOI: 10.1139/L00-004.
15. Maruyama K., Zhao W. Flexural and shear behavior of concrete beams reinforced with FRP rods. Swamy R. N. (ed.). Corrosion and corrosion protection of steel in concrete. Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. Pp. 1330–1339.
16. Maruyama K., Rizkalla S.H. Shear Design Consideration for Pretensioned Prestressed Beams. ACI Structural Journal. 1988. Vol. 85, No. 5. Pp. 492–498. DOI: 10.14359/2782.
17. Nagasaka T., Fukuyama H., Tanigaki M. Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups. Fiber-reinforced plastic reinforcement for concrete structures – international symposium. Detroit: American Concrete Institute, 1993. Pp. 789–812. DOI: 10.14359/4138.
18. MacGregor J.G. Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 938 pp.
19. Hegger J., Niewels J., Kurth M. Shear analysis of concrete members with fiberreinforced polymers (FRP) as internal reinforcement. Collected papers of 9th international symposium on fiber-reinforced polymer reinforcement for concrete structures FRPRCS-9. Sydney, Australia, July 13–15, 2009. Sydney, Australia: International Institute for FRP in Construction, 2009.
20. Tomlinson D., Fam A., Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure

and Shear. Journal of Composites for Construction. 2014. Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000491.

21. ABAQUS Online Documentation: Version 6.5-1. URL: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsa/default.htm?startat=ch01s02.html>.

22. Raza A., Khan Q.U.Z., Ahmad A. Numerical Investigation of Load-Carrying Capacity of GFRP-Reinforced Rectangular Concrete Members Using CDP Model in ABAQUS. Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019, No. 1. DOI: 10.1155/2019/1745341.

23. Wahalathantri B.L., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Fawzia S. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, Queensland University of Technology. Brisbane, 2011. Pp. 260–264.

24. Solhmirzaei R., Kodur V. A Numerical Model for Tracing Structural Response of Ultra-

High Performance Concrete Beams. Modelling. 2021. Vol. 2. Pp. 448–466. DOI: 10.3390/modelling2040024.

25. Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Saleh M., Jaafar M. S. B., Karimzade K. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. Structural Engineering International. 2017. Vol. 27, No. 1. Pp. 68–78. DOI: 10.2749/101686616X1081.

26. Issa M.A., Ovitigala T., Ibrahim M. Shear behavior of basalt fiber reinforced concrete beams with and without basalt FRP stirrups. Journal of Composites for Construction. 2016. Vol. 20, No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000638.

27. Vivekanand S., Sumathi A. Static Behaviour of Concrete Beams Reinforced in Shear with GFRP Bars. International Journal of ChemTech Research. 2015. Vol. 8, No. 2. Pp. 635–642.

28. Usanov S.V., Tamov M.M. Crack resistance of support zone regions of I-beams with transverse reinforcement made of basalt composite bars [Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базалтокомпозитной арматуры]. Inženernyj vestnik Dona. 2022. Vol. 4, No. 88. Pp. 344–361. (rus)

Information about the authors

Tamov, Murat M. PhD, Assistant professor. E-mail: murat.tamov@gmail.com. Kuban State Technological University. Russia, 350072, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2.

Received 04.07.2025

Для цитирования:

Тамов М.М. Численные модели балок с композитным армированием наклонных сечений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 20–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29

For citation:

Tamov M.M. Numerical models for shear behavior of reinforced concrete beams with frp stirrups. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 20–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-30-38

**Опарина Л.А., Огурцов В.А., Власова Е.А., Обухова Ю.Д.
Ивановский государственный политехнический университет
E-mail: L.A.Oparina@gmail.com

УРАВЛЕНИЕ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ В ТЕЧЕНИЕ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Аннотация. *Тема адаптивного проектирования является актуальной и отвечает вызовам, стоящим перед современными архитектурно-строительными науками: изменение климата, ресурсо- и энергосбережение, экологические проблемы и другие. Изменение стиля жизни современного общества, требований к комфортности зданий и доступности инфраструктуры также являются факторами, определяющими тренды на адаптивное проектирование. Особенно актуальна данная тема для многоквартирных домов, в которых проживает и работает значительная часть населения страны. Многоквартирные дома должны сохранять требования устойчивого развития общества и отвечать климатическим и другим вызовам на протяжении всего жизненного цикла. В статье систематизированы факторы, влияющие на тенденции архитектуры и строительства в многоквартирных зданиях. Разработаны показатели для адаптивного проектирования многоквартирных домов с учётом нормативных требований. Предложены расчётные формулы для данных показателей, учитывающие динамику жизненного цикла многоквартирных домов. Разработана форма уравнения адаптивного проектирования многоквартирных домов в течение жизненного цикла в дифференциальной форме. Уравнение адаптивного проектирования выражает динамическое изменение термического сопротивления теплопередачи с учётом отклонения температуры от климатической нормы, температурной адаптации строительных материалов, коэффициента влияния осадков, характеризующий гидрогеологическую адаптацию и скорость изменения количества осадков в течение жизненного цикла зданий. Продемонстрирована преимущество предлагаемого подхода с методами решения нелинейных уравнений в физике и механике сплошных сред. Предложено использование метода Эйлера для решения данного динамического уравнения. Добавлены расчётные примеры, демонстрирующие практическую ценность уравнения при проектировании.*

Ключевые слова: *адаптивное проектирование, дифференциальное уравнение, жизненный цикл здания, многоквартирный дом.*

Введение. Актуальной проблемой и вызовом, стоящим перед современной архитектурно-строительной наукой, является проблема изменения климата. Данные изменения можно наблюдать повсеместно, например, в центральной части России постепенно лето становится более жарким, а зима менее продолжительной, теплой и бесснежной. При этом увеличивается интенсивность и скорость изменения осадков. По данным официального доклада НИУ Росгидромета за 2024 год, последствия глобального потепления увеличиваются с 1970 года с каждым десятилетием. Самым теплым годом из истории метеорологических наблюдений стал 2024 год, при этом наблюдались новые повышенные значения температур океанов, морей и поверхности почвы. Одновременно в атмосфере наблюдался рост концентрации парниковых газов – углекислого газа 426,2 млн⁻¹ и метана 2032,4 млрд⁻¹. В Российской Федерации после 1970-х наблюдался рост среднегодовой температуры в 2,5 раза, при этом потепление происходит во всех сезонах и на всей территории РФ. Данные изменения способствуют учащению явлений засухи в регионах,

выращивающих зерно, деградацию вечной мерзлоты, что угрожает фундаментам зданий, сходу лавин и опасности наводнений. В целом на территории России наблюдается тенденция к увеличению осадков. Интенсивность данных негативных изменений в ряде регионов может быть высокой [1]. Анализ прогнозов МГЭИК (англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC – Межправительственная группа экспертов по изменению климата) и прогнозных сценариев показал, что данные тенденции сохранятся: к 2050 году среднегодовая температура в РФ может повыситься ещё на 1-2 градуса, с увеличением концентрации CO₂ в атмосфере [2].

Несомненным остаётся тот факт, что указанные тенденции и прогнозы непосредственным образом влияют на человечество и среду его обитания, неотъемлемой частью которого являются здания, строения, сооружения. Строительная отрасль, жилищно-коммунальное хозяйство испытывают на себе влияние климатических изменений [3]. Это может проявляться в постепенные потери устойчивости фундаментов в регионах с оттаиванием вечной мерзлоты, увеличении

нагрузки на системы кондиционирования, перегрев зданий в летнее время, подтопления из-за наводнений и другие. Проектирование без учёта этих факторов ведёт к сокращению срока службы зданий, росту аварийности и экономических потерь (до 1,5 % ВВП к 2050 г.) Данные изменения необходимо учитывать уже сейчас при проектировании зданий, особенно это касается многоквартирных домов, проектируемых с длительным сроком службы (100–150 лет) без изменения своего функционального назначения. В общем виде методология оценки жизненного цикла объектов капитального строительства (ОКС) с позиции учёта изменения климата включает последовательность этапов: сбор и обработка информации о влиянии климатических изменений на ОКС; оценка климатического риска; разработка и принятие мер по адаптации ОКС к климатическим изменениям; анализ экономической и практической эффективности принятых мер по адаптации [4]. Таким образом, адаптация зданий к климатическим изменениям является важнейшей задачей, стоящей перед современной наукой.

В мировой архитектурно-строительной практике появилось и активно развивается новое направление: адаптивная архитектура, основным принципом которой является разработка архитектурных, конструктивных и инженерных решений в зданиях и других объектах капитального строительства, обеспечивающих их адаптацию к изменяющимся параметрам внешней среды. Это сложная, многоаспектная деятельность, интегрирующая устойчивые архитектурные решения, отвечающие на современные вызовы и потребности общества: энергоэффективность, гибкость и мобильность и интерактивность среды (человек, пространство и цифровые технологии) [5]. Примеры адаптивной архитектуры имеются как в зарубежной, так и в отечественных научных исследованиях. Jungwon Y. провёл исследование устойчивой и энергоэффективной оболочки здания с использованием термочувствительных «умных» материалов и представил концепцию проектирования адаптивных к климату фасадов с упором на термочувствительность «умных» материалов [6]. Адаптивная архитектура применяется при проектировании зданий больниц, включающих такие элементы дизайна, как гибкая планировка помещений, легко адаптируемые системы вентиляции и антимикробные покрытия [7]. В исследовании [8] рассматривается возможность адаптации общественных зданий для улучшения показателей здоровья и социальной устойчивости. На конкретных примерах оценивается адаптивность архитектуры с точки зрения пространственного, экономического и социального воздействия. Авторы предлагают гибридизацию

медицинских учреждений и торговых центров, проектирование которых осуществлять на междисциплинарном подходе с привлечением архитекторов, градостроителей, медицинских экспертов и граждан к формированию более здоровых городских пространств. В исследовании [9] выдвигается тезис о том, что универсальные архитектурные решения имеют ограниченную эффективность из-за специфических климатических и экологических требований. Однако надлежащим образом разработанная адаптивность модульных форм позволяет преодолеть эти ограничения. Выводы показывают, что достижение устойчивого и экологичного дизайна возможно путем адаптации технологий, материалов и архитектурных форм к местным климатическим условиям.

Одной из составляющих современной методологии управления различными процессами, в том числе и строительными проектами и зданиями, является концепция жизненных циклов. В основе экоустойчивого подхода в строительстве лежит оценка жизненного цикла здания от начала проектирования и создания эксплуатационной системы до ввода в эксплуатацию [10]. Проектировать здания нужно с учётом всего их жизненного цикла [11–12]. Таким образом, обеспечивается адаптация здания к климатическим изменениям в течение длительного периода эксплуатации.

Особое место в типологии объектов капитального строительства занимают многоквартирные дома (МКД). Динамика строительства МКД имеет тенденцию к устойчивому росту [13]. Социальные тенденции развития общества направлены на использование квартир не только для жилья, но и для работы, имеющей дистанционный характер, а также преимущественное использование первых этажей МКД под общественное назначение. Таким образом, МКД – это не только жильё, но и рабочие места и их проектированию на длительную эффективную эксплуатацию в течение жизненного цикла необходимо уделять особое внимание. Учитывая значительную протяжённость жизненного цикла многоквартирных зданий (срок службы зданий каменных, особо капитальных составляет 100–150 лет), их необходимо проектировать с сохранением параметров надёжности, энергоэффективности, комфортности на протяжении этого длительного периода. При этом одним из важнейших факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики МКД, являются климатические факторы. В настоящее время адаптивное проектирование МКД с учётом жизненного цикла находится в начале своего развития, и эта тема исследований является очень актуальной.

Материалы и методы. Адаптивное проектирование зданий в целом, и многоквартирных домов в частности, основано на междисциплинарном подходе, так как это комплексная, системная технология, которая учитывает динамику изменений состояний конструктивных элементов зданий в течение жизненного цикла, изменение климатических параметров, оказывающих воздействие на здание, экологическое и энергетическое моделирование зданий.

В настоящее время разработаны и применяются различные математические модели проектирования зданий, учитывающие климатические изменения, среди которых можно выделить:

– Общая модель теплопередачи через ограждающие конструкции:

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial t} = \text{div} \lambda \nabla T \mp C_{RF} \frac{\partial T}{\partial x} + Q_{sou}, \quad (1)$$

$$\tilde{H} = \int_0^T [c\rho + \delta(\xi - T^*)i_{met}w\rho_w L] d\xi,$$

где T^* – температура фазового перехода вода-лед, °С;

L – льдистость материала, доли единицы;

w – весовая влажность материала, доли единицы;

ρ_w – плотность воды, кг/м³;

i_{met} – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг;

$\delta(\xi - T^*)$ – дельта-функция Дирака;

J_F – расход воздуха через единицу поверхности ограждения, кг/(м²·ч);

Q_{sou} – удельная мощность источников тепла в ограждении, Вт/м³;

C_R – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);

c, ρ – соответственно удельная теплоемкость в Дж/(кг·°С) и плотность материалов слоев ограждения, кг/м³ [14].

– Математическая модель процесса нестационарной теплопередачи через ограждающие конструкции, эксплуатируемые в условиях прерывистого отопления, основанная на определении удельных затрат тепловой энергии на нагрев многослойной наружной стены (КДж/м²):

$$Q_H = \sum_{i=1}^n c_i * \rho_i * \delta_i * \Delta T_i \quad (2)$$

где c_i – удельная теплоемкость i -го слоя стены, кДж/кг·°С;

ρ_i – плотность i -го слоя наружной стены, кг/м³;

δ_i – толщина i -го слоя наружной стены, м;

ΔT_i – Изменение температуры i -го слоя стены [15].

– Модель деформации основания при наличии вечномёрзлых грунтов:

$$S = S_{th} + S_p, \quad (3)$$

где S – осадка оттаивающего в процессе эксплуатации сооружения;

S_{th} – составляющая осадки основания, обусловленная действием собственного веса оттаивающего грунта;

S_p – составляющая осадки основания, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения.

В приведённых и аналогичных методиках оцениваются различные показатели и факторы климатического влияния на процессы, происходящие в зданиях и других строительных объектах. Однако большинство из них не учитывают динамику изменений в течение жизненного цикла здания (50–100 лет), также не учитываются климатические изменения и адаптационные изменения конструкций зданий под их воздействием во взаимосвязи, таким образом, остаётся непроработанным вопрос комплексного учёта воздействия совокупности факторов. Учитывая сложность, многоаспектность обозначенной проблемы, необходимо использовать междисциплинарный подход, синтезирующий в себе:

- экологическое моделирование – использование математических методов и инструментов для анализа и прогнозирования поведения экологических систем;
- строительную механику – учёт деформаций фундаментов при таянии мерзлоты;
- климатологию – интеграция прогнозных сценариев МГЭИК для параметра, характеризующего изменение климата во времени.

Основная часть. На основе синтеза обозначенных подходов авторами предлагается уравнение адаптивного проектирования зданий, которое является авторской разработкой, поскольку оно впервые объединило эти элементы для задач архитектурного проектирования.

Предлагаемое авторами уравнение адаптивного проектирования имеет вид:

$$R(t) = R_0^{TP} * e^{\alpha * \Delta T(t)} + \beta * \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

где $R(t)$ – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции здания в год t ;

R_0^{TP} – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, (м² · °С)/Вт, принимаемое в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП), (°С·сут)/год, региона строительства (СП 50.13330.2024);

α – коэффициент температурной адаптации материала (1/°С);

$\Delta T(t)$ – отклонение температуры от климатической нормы (°С);

β – коэффициент влияния осадков, характеризующий гидрологическую адаптацию ($\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч} / \text{Вт} \cdot \text{мм}$)

$\frac{dP}{dt}$ – скорость изменения количества осадков (мм/год).

Ключевые компоненты уравнения основаны на работах И.В. Попова (адаптивные методы решения уравнений Навье-Стокса), где вводится концепция динамической коррекции параметров под изменяющиеся условия; И.М. Куликова (релятивистская гидродинамика на адаптивных сетках), чьи методы адаптации вычислительных сеток к разномасштабным процессам легли в основу идеи «гибкого» проектирования; И.В. Бойкова (адаптивные разностные схемы для теплопроводности), чьи работы доказали эффективность локальной параметризации под нестационарные поля. Так, И.В. Поповым в работе [16] предложен адаптивный метод решения уравнения Навье-Стокса, в котором множитель, учитывающий вязкостные эффекты, записывается в дифференциальной форме, позволяющей учесть скорость изменения градиентов давления и температуры при расчёте течения среды. Аналогично этому, в предлагаемом уравнении (4) скорость изменения климатических факторов ($\frac{dP}{dt}$) используется для динамической коррекции термического сопротивления, что обеспечивает учёт накопленных нагрузок и инерционности отклика материалов. Работы И.М. Куликова [17], посвящённые релятивистской гидродинамике на адаптивных сетках, продемонстрировали эффективность локального перераспределения узлов сетки в зависимости от пространственно-временных градиентов физических полей. Эта идея легла в основу концепции «гибкого» проектирования, реализованной в уравнении (4): параметры конструкции адаптируются не статически, а в зависимости от скорости изменения внешних воздействий. И.В. Бойков [18] разработал адаптивные разностные схемы для уравнения теплопроводности, в которых шаг дискретизации зависит от локальных градиентов температуры. Это позволяет точнее моделировать нестационарные процессы. В данном случае аналогичный принцип применяется к проектированию – чем выше скорость изменения климатических параметров, тем больше необходимая величина корректировки термического сопротивления.

Применение дифференциальной формы уравнения обусловлено несколькими факторами:

1. Динамика климата – это непрерывный процесс, а не точка данных. Температура/осадки меняются непрерывно, и дифференциальные уравнения идеально описывают такие изменения. Например, скорость таяния мерзлоты (dS/dt)

зависит от текущей температуры $T(t)$, а не от её среднего значения за год. Климатические параметры (температура, влажность, осадки) меняются непрерывно во времени. Статические модели (например, регрессия) не учитывают:

- накопление эффектов (например, просадка фундамента из-за циклов замерзания-оттаивания);
- запаздывание реакции материалов (бетон деформируется не мгновенно при скачке температуры);
- взаимовлияние факторов (рост влажности → коррозия арматуры → снижение прочности → рост деформаций).

2. Нелинейность эффектов. Упрощённые линейные модели (типа «если $+1\text{°C}$, то $R +5\%$ ») не работают при экстремальных сценариях. Дифференциальные уравнения учитывают пороговые явления – например, ускоренный рост нагрузки на кондиционирование при переходе за $+40\text{°C}$.

3. Обратная связь параметров здания. Требуемое сопротивление теплопередаче $R(t)$ влияет на энергопотребление, которое в долгосрочной перспективе усиливает локальный «остров тепла» – это замкнутый цикл, который описывается системой дифференциальных уравнений.

4. Дифференциальные уравнения в данном случае более целесообразны, чем регрессионные модели, так как регрессии дают статичный «снимок» зависимостей, но не предсказывают поведение системы при выходе за рамки исторических данных – например, при беспрецедентной жаре $+55\text{°C}$ в Сибири к 2100 г. Согласно прогнозам МГЭИК (IPCC AR6 WG1) и национальным сценариям, к концу века (2100 г.) в южных районах Сибири возможно достижение температур до $+55\text{°C}$ в летний период в рамках сценария SSP5-8.5 [21]. Эти данные подтверждают необходимость учёта экстремальных климатических сценариев при проектировании зданий с длительным сроком службы. Дифференциальные уравнения же позволяют варьировать начальные условия и сценарии.

Для жизненного цикла здания (50-100 лет) критична проекция изменений. Дифференциальные уравнения позволяют моделировать сценарии через механизмы, а не статистику, учитывают инерционность климатической системы (например, запаздывание реакции океанов на выбросы CO_2), дают возможность варьировать начальные условия (разные регионы РФ).

Таким образом, в уравнение адаптивного проектирования введён оператор дифференцирования как необходимое условие описания накопленных эффектов (кумулятивное воздействие осадков) и нестационарных процессов (измене-

ние режима увлажнения во времени). Дифференциальный оператор $\frac{dP}{dt}$ позволяет формализовать скорость изменения климатических нагрузок, учесть инерционность отклика строительных конструкций и построить прогнозные сценарии методами численного интегрирования.

При этом критичным является темп нарастания риска (например, если месячная норма дождей выпадает за 3 дня, то резко возрастает риск подтопления фундамента). Для осадков $P(t)$ – это интенсивность изменения осадков (мм/год). Является ключевым параметром для оценки гидрологической нагрузки на здание.

Примеры применения предложенного уравнения:

Пример 1. Учёт скорости изменения осадков.

Согласно докладу Росгидромета, на большей части территории России, включая Сибирь, наблюдается положительная тенденция к увеличению годового количества осадков [1]. Предположим, что для города Красноярск эта скорость составляет 2 мм/год (оценочная величина, соответствующая общему тренду). Примем $\beta_p = 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч} / \text{Вт} \cdot \text{мм}$. При этом базовое сопротивление $R_0 = 3,2 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$ (по СП 50.13330.2024). Тогда поправка за гидрогеологическую адаптацию составит:

$$\beta_p * \frac{dP}{dt} = 0,005 * 2,1 = 0,0105 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}.$$

Таким образом, через 30 лет накопленная корректировка достигнет $\approx 0,3 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}$, что эквивалентно увеличению толщины утеплителя на 5-7 см. Без учёта этой динамики возможны ошибки в проектировании водоотвода и фундаментов.

Пример 2. Адаптация к температурным аномалиям.

Средняя температура в регионе повышается на $0,4 \text{ °C}$ в десятилетие. При $\alpha_T = 0,01 \text{ 1/°C}$ и $\Delta T(t) = +2,5 \text{ °C}$ (ожидаемое отклонение к 2050 г.), дополнительная поправка составит:

$$\Delta T(t) = 0,01 \times 2,5 = 0,025 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт}.$$

Это означает, что уже сегодня при проектировании следует закладывать повышенное термическое сопротивление, чтобы избежать перегрева зданий в будущем. Такой подход и называется адаптивной теплоизоляцией – это не просто увеличение толщины утеплителя, а его динамический подбор с учётом прогнозируемой скорости изменения климата

Применение статической формы уравнения позволяет учесть только пиковые значения и дать консервативную оценку. Применение динамиче-

ской формы уравнения позволяет учесть скорость изменения и разработать адаптивные решения. Динамическая форма позволяет применить оператор дифференцирования к функции осадков, физически соответствует скорости изменения гидрологической нагрузки на здание, является ключевым для моделирования долговременной адаптации конструкций. Динамическая форма модели отличает её от статических аналогов через введение темпоральной динамики (специфическую взаимосвязь моментов времени и временных характеристик, динамику изменений явлений и процессов, временную сущность явлений). Уравнение реализует принцип Остроградского-Гамильтона для строительной механики: «Будущее состояние конструкции определяется не только текущими воздействиями, но и скоростью их изменения».

Адаптивное проектирование должно обеспечивать надёжность здания в течение всего жизненного цикла. Связь с теорией надёжности достигается реализацией принципа «проектирования по производной», согласно которому, критичен не абсолютный уровень воздействия, а его градиент, определяющий скорость старения материалов. В уравнении учтён отклик материалов на рост температуры, он является нелинейным [19, 20]. Данный элемент уравнения можно выражен в форме: $e^{\alpha * \Delta T(t)}$. Экспонента в данном случае описывает ускоренную деградацию при превышении пороговых значений (например, размягчение битума при $+70 \text{ °C}$).

Динамическое сопротивление теплопередаче, учёт старения материалов и изменение климатических норм в модели обеспечивается функцией $R(t)$ – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции в год t . Для динамического моделирования предложенное уравнение может быть решено численно (например, методом Эйлера):

Выводы. Архитектура будущего – это симбиоз математики, экологии и гибкости. Проектируя под изменчивый климат, архитекторы создают здания-хамелеоны, способные адаптироваться к новым вызовам века. Предложенное уравнение адаптивного проектирования является одним из действенных инструментов решения проблемы устойчивости жизненного цикла зданий. Уравнение основано на внедрении динамических поправок к основному показателю тепловой защиты зданий – сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Применение данного уравнения позволит обеспечить надёжность и комфортный микроклимат зданий при изменяющихся климатических условиях на долгий срок, а также сократить затраты в течение жизненного цикла зданий за счёт уменьшения

количества ремонтов и в целом снизить энергопотребление зданий за счёт адаптивной теплоизоляции и, соответственно, снизить углеродный след и нагрузку на окружающую среду от эксплуатации здания в течение жизненного цикла. Под адаптивной теплоизоляцией понимается проектирование ограждающих конструкций с учётом динамики климатических изменений, включая скорость изменения температуры и осадков, что позволяет заранее закладывать запас устойчивости и избегать дорогостоящих модернизаций в будущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год [Электронный ресурс] / http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2024_with_cover.pdf (Дата обращения 17.08.2025).
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Вероятностная оценка наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Российской Федерации: температура воздуха // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2011. Т. 24. С. 43–70.
3. Швец А.Е., Шеина С.Г. Влияние изменения климата на строительную отрасль // В сборнике: Строительство и архитектура – 2024. Материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства. Ростов-на-Дону, 2024. С. 297–299.
4. Шеина С.Г., Чернявский И.А. Управление жизненным циклом объектов капитального строительства в условиях изменения климата // Молодой исследователь Дона. 2025. №10(1). С. 72–75.
5. Пономарёв А.В. Адаптивная архитектура – основные направления развития. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2024. Т. 14(2). С. 406–417. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-406-417. EDN: EMMSWC
6. Jungwon Y. Climate-adaptive Facade Design with Smart Materials: Evaluation and Strategies of Thermo-Responsive Smart Material Applications for Building Skins in Seoul. Conference: PLEA 2018: Smart and Healthy Within the Two-Degree Limit. At: Hong Kong, 2018. Pp. 620–626.
7. Agrawal K. Adaptive Architecture and Infection Prevention in Hospitals. International journal of scientific research in engineering and management. 2024. No. 08(04):1-5. Pp. 25–30. DOI:10.55041/IJSREM30035
8. Zinoski M., Petrunova I., Brsakoska J. The Architecture of Public Buildings as a Transformative Model Toward Health and Sustainability. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2025. Vol. 22. 736. DOI: 10.3390/ijerph22050736.
9. Maciejko A., Grześkowiak M., Kowalska A. Climate and sustainability in architecture: analysis of challenges and limitations for universal solutions in the design of single-family houses. Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure. 2025. Vol. 191. Pp. 84–94. DOI: 10.54941/ahfe1006612.
10. Федосов С.В., Нармания Б.Е., Смирнова Е.Л., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Понятие «жизненный цикл здания»: к вопросу о концептуализации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 584–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.584-595
11. Горбанева Е.П., Косовцева И.А., Кстенин Т.В. Оптимизация экономических результатов внедрения энергосберегающих мероприятий в течение полного жизненного цикла объекта капитального строительства // Real Estate: Economics, Management. 2023. № 4. С. 45–49.
12. Сулейманова Л.А., Обайди А.А. Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 3. С. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46
13. Глаголев Е.С., Сулейманова Л.А., Марушко М.В. Развитие жилищного строительства в России // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 17–22. DOI: 10.12737/23587
14. Гражданкин А.А., Иванченко В.Т., Письменский А.В. Математическое моделирование теплопередачи через ограждающую конструкцию // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 6. С. 29–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-29-39
15. Вытчиков Ю.С., Беляков И.Г., Сапарёв, М.Е. Математическое моделирование процесса нестационарной теплопередачи через строительные ограждающие конструкции в условиях прерывистого отопления // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. С. 42–48. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.180
16. Попов И.В., Фрязинов И.А. Метод адаптивной искусственной вязкости для решения системы уравнений Навье–Стокса // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2015. Т. 55, № 8. С. 1356–1362. DOI: 10.7868/s0044466915080141
17. Куликов И.М., Караваев Д.А. Кусочно-параболическая реконструкция физических переменных в методе HLL при решении уравнений

релятивистской гидродинамики // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. Новосибирск. 2023. Т. 26, № 1. С. 57–75.

18. Бойков И.В., Рязанцев В.А. Построение адаптивных разностных схем решения уравнения теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2017. № 1(41). С. 68–81. DOI 10.21685/2072-3040-2017-1-7

19. Белов М.П., Синяков Р.И. Динамика решетки и нелинейный отклик ОЦК-титана на деформации при высокой температуре в методе *ab initio* молекулярной динамики // Физика твердого тела. 2022. Т. 64(8). С. 915–919. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52682.362

Информация об авторах

Опарина Людмила Анатольевна, доктор технических наук, заведующий кафедрой организации производства и городского хозяйства. E-mail: L.A.Oparina@gmail.com. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21.

Огурцов Валерий Альбертович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и инженерных систем. E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21.

Власова Екатерина Анатольевна, аспирантка. E-mail: vkatru@mail.ru. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21.

Обухова Юлия Дмитриевна, аспирантка. E-mail: oobuhova@yandex.ru. Ивановский государственный политехнический университет. Россия, 153000, Иваново, Шереметевский пр-кт, д. 21.

Поступила 29.09.2025 г.

© Опарина Л.А., Огурцов В.А., Власова Е.А., Обухова Ю.Д., 2025

***Oparina L.A., Ogurtsov V.A., Vlasova E.A., Obukhova Y.D.**

Ivanovo State Polytechnic University

**E-mail: L.A.Oparina@gmail.com*

EQUATION FOR ADAPTIVE DESIGN OF APARTMENT BUILDINGS DURING THEIR LIFECYCLE

Abstract. *The topic of adaptive design is highly relevant and addresses the challenges facing modern architectural and construction sciences: climate change, resource and energy efficiency, environmental issues, and others. Changes in contemporary societal lifestyles, increasing demands for building comfort, and infrastructure accessibility are also key factors shaping trends toward adaptive design. This topic is particularly important for multi-apartment residential buildings, where a significant portion of the population lives and works. Multi-apartment buildings must meet sustainable development goals and respond effectively to climatic and other challenges throughout their entire life cycle.*

This paper systematizes the factors influencing current trends in architecture and construction within multi-apartment buildings. Indicators for adaptive design of multi-apartment buildings have been developed, taking into account regulatory requirements. Calculation formulas for these indicators are proposed, incorporating the dynamics of the building's life cycle. A differential equation formulating adaptive design for multi-apartment buildings over their life cycle is introduced. The adaptive design equation expresses the dynamic variation of thermal resistance to heat transfer, considering deviations of temperature from climatic norms, temperature-induced adaptation of construction materials, and a precipitation impact coefficient characterizing hydrogeological adaptation and the rate of change in precipitation volume over the building's life cycle. The Euler method is proposed for solving this dynamic equation. The proposed approach's continuity with methods for solving nonlinear equations in physics and continuum mechanics is demonstrated. The use of Euler's

method for solving this dynamic equation is proposed. Calculation examples are included, demonstrating the practical value of this equation in design.

Keywords: adaptive design, differential equation, building life cycle, multi-apartment residential building.

REFERENCES

1. Report on Climate Features in the Territory of the Russian Federation in 2024 [Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2024 god]. http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2024_with_cover.pdf (Date of access: 17.08.2025). (rus)
2. Gruzha G.V., Rankova E.Ya. Probabilistic Assessment of Observed and Expected Climate Changes in the Russian Federation: Air Temperature [Veroyatnostnaya otsenka nablyudaemikh i ozhidaemikh izmenenii klimata Rossiiskoi Federatsii: temperatura vozdukh]. Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling. 2011. Vol. 24. Pp. 43–70. (rus)
3. Shvets A.E., Sheina S.G. Impact of Climate Change on the Construction Industry [Vliyanie izmeneniya klimata na stroitelnyuyu otrasl]. In: Construction and Architecture – 2024. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering. Rostov-on-Don, 2024. Pp. 297–299. (rus)
4. Sheina S.G., Chernyavskiy I.A. Life Cycle Management of Capital Construction Projects under Changing Climate Conditions [Upravlenie zhiznennim tsiklom obektov kapitalnogo stroitelstva v usloviyakh izmeneniya klimata]. Young Researcher of Don. 2025. Vol. 10(1). Pp. 72–75. (rus)
5. Ponomaryov A.V. Adaptive Architecture – Main Development Trends [Adaptivnaya arkhitektura – osnovnie napravleniya razvitiya] Izvestiya Vuzov. Investments. Construction. Real Estate. 2024. 14(2). Pp. 406–417. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-406-417. EDN: EMMSWC
6. Jungwon Y. Climate-adaptive Facade Design with Smart Materials: Evaluation and Strategies of Thermo-Responsive Smart Material Applications for Building Skins in Seoul. PLEA 2018: Smart and Healthy Within the Two-Degree Limit. Hong Kong, 2018. Pp. 620–626.
7. Agrawal K. Adaptive Architecture and Infection Prevention in Hospitals. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. 2024. Vol. 8, No. 4. Pp. 25–30. DOI: 10.55041/IJSREM30035
8. Zinoski M., Petrunova I., Brsakoska J. The Architecture of Public Buildings as a Transformative Model Toward Health and Sustainability. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2025. Vol. 22. Art. 736. DOI: 10.3390/ijerph22050736
9. Maciejko A., Grześkowiak M., Kowalska A. Climate and Sustainability in Architecture: Analysis of Challenges and Limitations for Universal Solutions in the Design of Single-Family. Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure. 2025. Vol. 191. Pp. 84–94. DOI: 10.54941/ahfe1006612
10. Fedosov S.V., Narmaniya B.E., Smirnova E.L., Konovalova V.S., Kasyanenko N.S. The Concept of "Building Life Cycle": On the Issue of Conceptualization [Ponyatie «zhiznennii tsikl zdaniya»: k voprosu o kontseptualizatsii]. Magazine of Civil Engineering. 2025. Vol. 20. No. 4. Pp. 584–595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.584-595 (rus)
11. Gorbanueva E.P., Kosovtseva I.A., Kstenin T.V. Optimization of Economic Outcomes from Implementing Energy-Saving Measures over the Full Life Cycle of a Capital Construction Project [Optimizatsiya ekonomicheskikh rezultatov vnedreniya energosberegayushchikh meropriyatii v techenie polnogo zhiznennogo tsikla obekta kapitalnogo stroitelstva]. Real Estate: Economics, Management. 2023. No. 4. Pp. 45–49. (rus)
12. Suleymanova L.A., Obaidi A.A. Building Life Cycle Management at the Operation Stage Using Artificial Neural Network and Machine Learning Models [Upravlenie zhiznennim tsiklom zdaniya na etape ekspluatatsii s ispolzovaniem modelei iskusstvennikh neironnikh setei i mashinnogo obucheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46 (rus)
13. Glagolev E.S., Suleymanova L.A., Marushko M.V. Development of Housing Construction in Russia [Razvitie zhilishchnogo stroitelstva v Rossii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 1. Pp. 17–22. DOI: 10.12737/23587 (rus)
14. Grazhdankin A.A., Ivanchenko V.T., Pis'mensky A.V. Mathematical Modeling of Heat Transfer through Enclosing Structures [Matematicheskoe modelirovanie teploperedachi cherez ograzhdayushchuyu konstruktsiyu]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 6. Pp. 29–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-29-39 (rus)
15. Vytchikov Yu.S., Belyakov I.G., Saparyov M.E. Mathematical Modeling of Unsteady Heat Transfer through Building Enclosing Structures under Intermittent Heating Conditions [Matematicheskoe modelirovanie protsessa nestatsionarnoi teploperedachi cherez stroitelnie ograzhdayushchie konstruktsii v usloviyakh prerivistogo otopeniya]. International Research Journal. 2016. Pp. 42–48. DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.180 (rus)
16. Popov I.V., Fryazinov I.A. Method of Adaptive Artificial Viscosity for Solving the Navier–

Stokes Equations System [Metod adaptivnoi iskusstvennoi vyazkosti dlya resheniya sistemi uravnenii Nave–Stoksa]. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2015. Vol. 55. No. 8. Pp. 1356–1362. DOI: 10.7868/S0044466915080141 (rus)

17. Kulikov I.M., Karavaev D.A. Piecewise-Parabolic Reconstruction of Physical Variables in the HLL Method for Solving Equations of Relativistic Hydrodynamics [Kusochno-parabolicheskaya rekonstruktsiya fizicheskikh peremennikh v metode HLL pri reshenii uravnenii relyativistskoi gidrodinamiki]. Siberian Journal of Numerical Mathematics / Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Novosibirsk, 2023. Vol. 26. No. 1. Pp. 57–75. (rus)

18. Boykov I.V., Ryazantsev V.A. Development of Adaptive Finite-Difference Schemes for Solving the Heat Conduction Equation [Postroenie adaptivnykh raznostnykh skhem resheniya uravneniya teploprovodnosti]. Universities' Proceedings. Volga Region. 2017. No. 1(41). Pp. 68–81. DOI: 10.21685/2072-3040-2017-1-7 (rus)

19. Belov M.P., Sinyakov R.I. Lattice Dynamics and Nonlinear Response of BCC-Titanium to Deformation at High Temperature by the ab initio Molecular Dynamics Method [Dinamika reshetki i nelineinii otklik OTsK-titana na deformatsii pri vysokoi temperature v metode ab initio molekulyarnoi dinamiki]. Physics of the Solid State. 2022. Vol. 64. No. 8. Pp. 915–919. DOI: 10.21883/FTT.2022.08.52682.362 (rus)

20. Shabolovskiy O.N., Krol D.G., Kontsevaya I.A. Strong Physical Nonlinearity and Spatial Inhomogeneity of Thermal Fields in Single-Component and Two-Component Systems [Silnaya fizicheskaya nelineinost i prostranstvennaya neodnorodnost teplovikh polei v odnokomponentnykh i dvukhkomponentnykh sistemakh]. Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2014. No. 1. Pp. 97–107. (rus)

21. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Information about the authors

Oparina, Lyudmila A. Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Production Organization and Urban Economy. E-mail: I.A.Oparina@gmail.com. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospekt, 21.

Ogurtsov, Valery A. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction and Engineering Systems. E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospekt, 21.

Vlasova, Ekaterina A., Postgraduate student. E-mail: vkatru@mail.ru. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospekt, 21.

Obukhova, Yulia D., Postgraduate student. E-mail: ooobuhova@yandex.ru. Ivanovo State Polytechnic University. Russia, 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Prospekt, 21.

Received 29.09.2025

Для цитирования:

Опарина Л.А., Огурцов В.А., Власова Е.А., Обухова Ю.Д. Управление адаптивного проектирования многоквартирных домов в течение их жизненного цикла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-30-38

For citation:

Oparina L.A., Ogurtsov V.A., Vlasova E.A., Obukhova Y.D. Equation for adaptive design of apartment buildings during their lifecycle. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-30-38

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-39-51

^{1,2,*}Ишмухаметова К.В., ^{1,2}Баймуратова С.Х.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Уфимский государственный нефтяной технический университет

*E-mail: ikv23@mail.ru

ИДЕНТИЧНОСТЬ КАК РЕСУРС РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ГОРОДОВ В КОНТЕКСТЕ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. В контексте агломерационных процессов и увеличении доли влияния в формировании агломерата именно крупных городов, малые города теряют возможность для дальнейшего развития и процветания. Процесс выявления и акцентирования городской идентичности является ресурсом для полноценного всестороннего развития города.

В статье рассмотрены такие понятия как культурный ландшафт, городская идентичность и территориальное брендинг. Определяя точки взаимосвязи между этими понятиями, авторы статьи формируют модель городской идентичности. Авторы вводят такие понятия как «поле», «пути» и «точки», которые представляют основные элементы конструкции модели. Уровни модели отражают не только иерархию взаимосвязи всех компонентов городской идентичности, но и стадийность анализа контекста города.

Авторы статьи фокусируют внимание на компонентах культурного ландшафта, описывают их и предлагают рассматривать данные компоненты как пространственные территориальные объекты с возможной привязкой к конкретной локации города. Такой подход дает возможность рассматривать культурный ландшафт не только с позиции гуманитарных наук, но и как часть стратегии пространственного развития города. Представленная в статье модель дает возможность сопоставить понятийные области терминов «культурный ландшафт», «идентичность», «брендинг» города из социальных, экономических, географических, градостроительных и прочих наук, выявить элементы их синонимичности, схожести и взаимодополняемости.

Ключевые слова: культурный ландшафт, городская идентичность, брендинг территории, образ города, стратегия городского развития.

Введение. Идентичность имеет давнюю традицию исследования целым рядом философских, психологических, социологических и прочих гуманитарных наук. В связи с междисциплинарным подходом в контексте актуальной на сегодняшний день парадигме научного мышления, вопрос идентичности стал областью изучения архитектурных и градостроительных наук. Феномен городской идентичности, как локальный случай территориальной идентичности, все чаще фигурирует в качестве базового компонента при градостроительном анализе, является основой выстраивания стратегии городского развития [1].

Понятийная область городской идентичности пересекается с такими терминами как культурный ландшафт, образ города, бренд города. Каждый из этих понятий по отдельности имеет научное основание для исследования, но на данный момент нет научного подхода для формирования взаимосвязанности этих явлений в единую систему или модель.

Необходимость формирования единой модели взаимосвязи и взаимодействия элементов формирования городской среды и стратегий развития города обусловлена тем фактором, что она

может стать инструментом сохранения городского статуса, дальнейшего развития и процветания малых городов.

В связи с активными агломерационными процессами доминирующую роль на себя берут центры агломераций. Привлекательность столичных и крупных городов для населения малых городов становится все сильнее, что способствует внутренним, в пределах агломерации, миграционным процессам и как следствие убыванию численности жителей малых городов.

На примере статистики численности населения малых городов Башкортостана можно проследить тенденцию к увеличению убыли населения малых городов [2]. И как следствие, стагнацию городской экономики этих городов, деградацию городской среды и маргинализацию населения.

Однако есть и иные процессы, свидетельствующие о фундаментальном влиянии качества городской среды на сохранение и даже прирост населения города. Те города (Янаул, Мелеуз, Агидель, Дюртюли), в которых были реализованы программы формирования современных, отвечающих идентичности этих городов, общественных пространств в рамках федерального

гранта на развитие малых городов и исторических поселений с период 2019 по 2023 года, обрели потерянную привлекательность как города для жизни современного человека и получили новый импульс для городского развития.

Процесс выявления и акцентирования городской идентичности малого города является ресурсом для полноценного всестороннего развития города. В статье рассмотрены такие понятия как культурный ландшафт, городская идентичность и территориальное брендинг. Определяя точки взаимосвязи между этими понятиями, авторы статьи предлагают рассмотреть единую модель городской идентичности как инструмента для выявления ресурсов развития города.

Целью данной статьи является описание понятийных связей таких феноменов как *городская идентичность*, *культурный ландшафт города* и *бренд города*; на основе выявленных и описанных связей сформировать прототип модели формирования стратегии городского развития на основе городской идентичности. *Объект исследования* – понятийная область таких терминов как «*городская идентичность*», «*культурный ландшафт города*», «*бренд города*». *Предмет исследования* – понятийные связи «*городская идентичность*», «*культурный ландшафт города*», «*бренд города*».

Задачи исследования:

- анализ понятийной области таких терминов как «*городская идентичность*», «*культурный ландшафт города*», «*бренд города*»;
- определение системы взаимосвязанности понятий «*городская идентичность*», «*культурный ландшафт города*», «*бренд города*»;
- сформировать прототип модели выявления оснований для стратегии городского развития.

Материалы и методы. В исследовании применялись такие подходы как системный, структурно-функциональный, социокультурный, целостный подходы. Были использованы методы градостроительного и ретроспективного анализа, междисциплинарного синтеза и метод обобщения. Применен метод моделирования и гипотетико-дедуктивного построения.

В области культурного ландшафта исследование опирается на феноменологический подход В. Л. Каганского [3, 4] и его последователей О. А. Лавреновой и В. В. Абашева [5]. Городская идентичность в основном рассматривается с точки зрения социологических наук, опираясь на философско-антропологическое основание. Данный подход представлен в работах таких ученых как Г.В. Горнова [6–7], Е. В. Головнева [8–9], Н.А. Шматко [10], И.С. Самошкина [11], А.Г.

Манакова [12], А.В. Мекляева [13] и другие. В работах данных ученых идентичности города и идентичности горожанина является единым синтетическим понятием. Городская идентичность рассматривается сквозь призму личностного опыта, акцентируя непосредственное переживание индивидуумом своей причастности к городскому пространству, гармоничное соответствие масштаба города и внутреннего мира человека. Но исследования в области надличностных, коллективных, аспектов восприятия среды и городских контекстов в работах таких авторов как К. Линч [14], А. Руссо [15], Я. Ассман [16] и других, дали основание в данной работе выйти на уровень целостного универсального подхода к городу. Это позволило говорить об общих основаниях в области территориального брендинга, культурного ландшафта и городской идентичности, опираясь на методологическую базу К. Динни [17], П. Е. Родькина [18] и Д. В. Визгалова [19].

Основная часть. Понятийная область термина культурный ландшафт. В начале 20-го века Отто Шлюттер ввел понятие культурного ландшафта как материальной проекции культуры на природный ландшафт. Карл Зауэр развил эту идею в своей книге «Морфология ландшафта» [20], выделяя ключевым актором в генезисе культурного ландшафта человека как носителя культуры, и осваивающего природный ареал согласно своим представлениям. Культурный ландшафт – это результат влияния человека на природную первооснову, как в процессе освоения территории для нужд жизнедеятельности, так и осмысления природы через ценностные категории красоты, значимости, образности, масштабности.

По мере развития и самого понятия, и подходов к изучению культурного ландшафта, сформировалось три подхода в работе с культурным ландшафтом: информационно-аксиологический, этнокультурный и феноменологический подходы.

При информационно-аксиологическом подходе основной акцент делается на ценностный аспект объектов культурного ландшафта. В этом подходе ключевое значение имеют объекты культурного наследия среды как трансляторы информации, передаваемой из поколения в поколение.

При этнокультурном подходе изучается след определенного этноса или сообщества на природной территории. Фиксируются культурные черты и особенности этнической группы или локального сообщества, сформированные благодаря или под влиянием особенности территории их проживания и освоения.

Феноменологический подход рассматривает культурный ландшафт как текст, структурно-семантическое образование, наполненное знаками и знаковыми системами. Основным идеологом данного подхода является В. Л. Каганский [3–4].

Культурный ландшафт – это «осознанный» человеком, интерпретированный природный ландшафт. Культурный ландшафт всегда наполнен ассоциациями и коммеморациями, он транслирует идеи и фиксирует в сознании человека основные смысловые доминанты. Культурный ландшафт осмыслен, его элементы имеют связи. Алгоритмы связей выстраивают нарратив территории. Культурный ландшафт выстраивает «диалог» с человеком посредством семантики связей своих смысловых доминант.

Город, как результат максимального влияния человека на природный ландшафт, является «квинтэссенцией» культурного ландшафта. Определяющим в терминологии культурного ландшафта, что это земное пространство, иными словами, некая территория, со всеми включающими в нее природными и антропогенными элементами. В городе антропогенный элемент становится доминирующим, но он же и в корне своем несет природную причинность. Планировочная структура города, формирование элементов городской ткани, облик городских зданий и строений, характер жизнедеятельности горожан, их городские практики, ритм и стиль городской жизни – все это было сформировано и приобрело именно такие формы под влиянием и осмыслением человека природной среды, территориальной городской первоосновы.

Одной из теоретических интерпретаций города является представление его как визуально и семиотически организованное культурное пространство, где каждый элемент – от архитектурных ансамблей до уличных знаков – несет в себе определенный смысл. Такой подход позволяет осмыслять все многообразие феноменов городской жизни и культуры через призму визуальной семиотики, раскрывающей глубинные культурные коды, заложенные в структуре и образах города. Такой взгляд на город близок к феноменологическому подходу В. Каганского.

Городская идентичность и культурный ландшафт. Если обратиться к определению архитектурной идентичности города А.А. Скалкина [21] через призму именно архитектурной науки, отделяясь от определения городской идентичности через призму социальных и прочих гуманитарных наук, то видна взаимосвязь понятий культурного ландшафта города и городской идентичности. А.А. Скалкин определяет городскую идентичность как естественным обра-

зом сформированную целостно узнаваемую совокупность материальных и нематериальных особенностей городской среды, ориентированных на внутреннее восприятие, обусловленных тождественностью с локальными факторами и представлениями о городе.

Городская идентичность – это те «особости», которые выделяют один город из множества других. Именно эти различия, эта уникальная «непохожесть», эта ярко выраженная индивидуальность и рождают у горожан чувство гордости и глубокой привязанность к своему городу. Историческая идентичность города бережно хранит его дух, позволяет ощутить его пульсирующую жизненную силу, неразрывно связывает поколения граждан, знаковые места и окружающее пространство воедино [7].

Таким образом выстраивается взаимосвязь понятий. Город – это территориальное «вместилище» культурного ландшафта. Назовем это территориальное «вместилище» *полем культурного ландшафта*. Тогда городская идентичность – это *доминанты*, или *узловые точки* этого поля, культурного ландшафта города.

Узловыми точками могут быть все компоненты культурного ландшафта города. Выборка или выделение из всего множества компонентов *поля культурного ландшафта* всецело зависит от фокуса восприятия человека, действующего лица процесса восприятия городской среды.

Механизмы восприятия человеком городской среды. Восприятие городской среды представляет собой сложный и многоуровневый процесс, обусловленный взаимодействием объективных характеристик городского пространства и субъективных особенностей воспринимающего. С одной стороны, человек воспринимает объективную реальность города, включающую в себя архитектурные сооружения, уличную сеть, планировку районов и другие элементы городской инфраструктуры. С другой стороны, на восприятие неизбежно накладывается отпечаток индивидуального психоэмоционального состояния воспринимающего, его культурный и мировоззренческий бэкграунд, степень осведомленности и информированности о предмете восприятия. Таким образом, восприятие городской среды формируется как синтез объективного и субъективного, создавая уникальный и многослойный опыт для каждого индивида [22].

А. В. Петровский выделяет среди прочих и такие свойства восприятия как целостность, структурность, осмысленность и избираемость [23].

Целостность восприятия проявляется в способности формировать внутренне согласован-

ную, органичную связь между отдельными элементами, создавая единый, завершённый образ. Этот цельный образ обретает независимое существование и отличен от суммы отдельных свойств частей восприятия. В контексте городской среды, формирование целостного образа происходит посредством интеграции и обобщения знаний, полученных из различных источников, таких как отдельные ощущения, впечатления о свойствах и качествах пространства.

Структурность восприятия возникает как результат сложной интеграции чувственных переживаний. Человек, по сути, воспринимает некий абстрагированный образ, или структуру, сформированную на основе этих ощущений, процесс становления которой разворачивается во времени. Таким образом старожилы города и иногородние туристы воспринимают город по-разному, в силу хотя бы временного различия пребывания в городе.

Свойство осмысленности проявляется в определенной смысловой нагрузке перцептивных образов. Восприятие неразрывно связано с мышлением, с постижением сути объекта и мысленным отнесением его к определенной категории или классу предметов и явлений. Эта взаимосвязь проявляется в избирательности восприятия, когда одни объекты выделяются на фоне других, привлекая преимущественное внимание.

Таким образом, человек находящейся в городской среде и воспринимающий компоненты поля культурного ландшафта города выделяет, структурирует и осмысливает в определенный образ не все разнообразие компонентов, а определенные *знаковые точки*, доминанты культурного ландшафта. Выделенные и структурированные в соответствии с определенной логикой эти точки становятся *каркасом* идентичности города.

Когнитивная карта восприятия городской среды. В рамках онтопсихологической концепции А. Менегетти [24], окружающая среда, включая городское пространство, наделена собственной семантической структурой. Человек, находясь в этой среде, подвергается воздействию ее семантического поля. Согласно Менегетти, все средовые объекты являются носителями информационных программ. Эти программы вступают во взаимодействие с человеком, формируя поведенческие и процессуальные паттерны горожан и урбанистических процессов.

Как же рождаются в сознании человека, погруженного в городское пространство, те информационные программы, что определяют его восприятие урбанистической среды? И.М. Коваль и В.В. Федоров в своей работе [25] указывают на ряд явлений, оказывающих влияние на этот

сложный процесс. Особое значение для понимания урбанистических процессов, формирующих городскую среду, представляют следующие феномены: формирование систем отсчета при восприятии свойств окружающей среды и феномен предметной реальности восприятия.

Первые проявления субъективности коренятся в стремлении человека создать личную систему координат для оценки окружающего мира, когда объективный эталон отсутствует. В процессе формирования индивидуального образа города, каждый человек разрабатывает уникальную шкалу ценностей, посредством которой оценивает различные аспекты городской среды. Эти процессы обуславливают глубоко личный характер восприятия, делая предпочтения каждого индивидуума неповторимыми и уникальными.

В процессе социализации на протяжении жизни человек усваивает не только фундаментальные ценности, нормы, правила поведения и установки, но и приобщается к бесчисленным артефактам человеческой культуры. Современный мир, особенно городская среда, перенасыщен этими объектами: историческими памятниками, архитектурными шедеврами, знаковыми местами, отражающими дух страны и города. Однако каждому индивиду свойственно формирование уникальной иерархии лично значимых объектов, которая и служит основой для построения так называемых когнитивных карт, отражающих субъективное восприятие и осмысление окружающего пространства.

Таким образом, идентичность города – это не просто набор выделенных *точек* культурного ландшафта города. Городская идентичность характеризуется в выстраивании и расположении этих точек в логике персонифицированной *когнитивной карты восприятия городской среды*.

Когнитивная карта определяет структуру и логику выборки из всего поля компонентов культурного ландшафта именно определенных *точек-доминант*. Структура *когнитивной карты* определяется уровнем и сложностью логических и ассоциативных связей или путей когнитивной карты.

Пути определяют логику связанности между точками культурного ландшафта, и собственно, формируют *каркас* идентичности города.

Пути имеют характер не только ментальных (семантических, символических, ассоциативных, нарративных, реминисцентных и иных) связей, определяя критерии выделения тех или иных компонентов культурного ландшафта. Они также могут обладать и характеристикой физических связей внутри города, отражаясь на карте города как пути движения от одного объекта или группы

объектов города до другого или других. *Пути* – это существующие или потенциальные культурные маршруты города. В этом плане пути в своем физическом аспекте синонимичны с путями, которые выделял как одну из пяти категорий образности города К. Линч: «Пути – это коммуникации, вдоль которых наблюдатель может перемещаться постоянно, периодически или только потенциально...» [14].

С одной стороны, *путь* – это субъективная выборка и личностный, индивидуализированный, трек построения связей между разными компонентами, *точками*, культурного ландшафта. Складываемый образ города, характеризующийся отраженной в сознании познающего, воспринимающего идентичности города, всегда уникален и своеобразен. Город предстает для каждого совершенно по-своему, отраженные образы городской идентичности всегда персонализированы. Можно ли тогда говорить о каких-то закономерностях или единстве восприятия образа города?

Универсальный образ города. Ученые, занимающиеся проблемой восприятия, выделяют помимо абсолютно личностных категорий факторов восприятия (психофизические характеристики человека, его уровень и развитость мышления, и прочее), так же как называемые надличностные факторы. С этими факторами связывают такие понятия в психологии как коллективная память и коллективное бессознательное.

Одним из первых ученых, описавших эффект коллективной памяти, был К.Г. Юнг [26-27]. Он выделяет «личное» и «сверхличное», или «коллективное» бессознательное, проявляемое через изначальные образы. Изначальные образы – это «архетипы» сознания, «первичный рисунок», повторяющийся опыт, который присущ всем, и благодаря которому в схожих ситуациях люди воспринимают близкие по содержанию символические формы или действуют и реагируют на внешнюю среду по стереотипным алгоритмам. При определенных условиях или при схожих внешних раздражителях архетипичные образы просачиваются в психику личности и возвышаясь до «уровня системы» довлеют над воспринимаемым образом среды, заставляя или подталкивая разных людей вести себя схожим способом.

Опираясь на исследования в области коллективной памяти, можно говорить о связи этого явления с формированием схожих *путей* между отдельными *точками культурного ландшафта* города.

В современной психологии репрезентации реальности [37] выражена понятием формирова-

ния «образа мира». В рамках обоснования возможности выделения схожих алгоритмов путей у множества людей и систематизации этих путей для формирования модели идентичности города, можно проследить алгоритм формирования «образа мира» у отдельного человека.

Познание реальности осуществляется в ходе ее репрезентирования или построения моделей. В процессе познания реальности у человека формируется образ мира – структура, в которой закрепляются все его когнитивные приобретения. Образ мира формируется на базе онтологически априорных форм познания, которые выработались в ходе эволюционного развития как биологического вида [7]. Полученный образ мира есть иерархическая система когнитивных репрезентаций, в основе которой лежат те самые архетипичные образы. Когнитивная репрезентация представляет собой неархаичную систему персональных конструкторов – элементарных единиц анализа соотношений сходства и различия событий. Цельный образ складывается при оперировании этими конструкторами в условиях столкновения с действующей реальностью. Априорность и схожесть базовых конструкторов у различных людей, особенно живущих и объединенных общей территорией, дает возможность говорить о близости восприятия индивидуальных образов города к некоему единому, *универсальному образу*.

Таким образом, можно говорить о формировании единого узнаваемого образа города [14]. Сама возможность существования базисного конструктора цельного образа города в сознании множества людей дает повод о выдвигании теории осознанного формирования и/или корректировки этого образа, что является сущностью территориального брендинга.

Брендинг территории. Брендинг города – это процесс создания его уникального образа в сознании жителей и мировой общественности [28].

В целом, под брендингом понимается система мероприятий по исследованию, формированию, развитию и продвижению ключевых элементов объекта продвижения [18]. Ключевыми элементами, в данном случае, являются компоненты идентичности города, ключевые *точки культурного ландшафта* города.

Брендинг города – это стратегический инструмент для укрепления экономики города, привлечения ресурсов и формирования позитивного имиджа. Он позволяет расширить экономическое влияние территории, стабилизировать ее развитие и улучшить инвестиционный климат. Главная цель – создание привлекательного и запоминающегося образа города, вызывающего лояль-

ность у жителей, инвесторов и туристов. Брендинг территории открывает новые рынки и способствует устойчивому развитию территории в целом [19].

Бренд территории, нацеленный на внешнюю аудиторию, должен органично вписываться в стратегию развития региона, становясь её ярким отражением и действенным инструментом [17]. Однако, бренд оказывает и «внутреннее» влияние на город, преобразуя саму ткань общественной жизни. Он способствует формированию цивилизованных социально-экономических отношений, укрепляет чувство единства и ответственности среди горожан, пробуждает истинный патриотизм и любовь к своей «малой родине», превращая ее в предмет гордости и заботы каждого жителя. Ввиду этого бренд территории должен быть отражением лучших черт ментальности и традиций населения территории, выполнять своеобразную культурно-идеологическую функцию, объединяя население территории для выполнения общих задач [18].

Сущность бренда территории заключается в том, что он должен обеспечивать идентификацию субъекта федерации, конкретный город, поселение и т.п. внутри страны и за ее пределами, причем идентифицировать в выгодном для субъекта бренда свете [37]. Элементами идентификации служит артикулированная когнитивная карта восприятия города. Из общего *поля культурного ландшафта* выделяются «*потенциально перспективные*» *точки*, компоненты идентичности города. «*Потенциально перспективными*» *точками*, можно назвать те компоненты, которые имеют «*позитивный*» имидж или несут его как таковой в потенциале. Сами по себе *точки* не формируют единого образа города, они есть, горожане могут их выделить, описать и охарактеризовать через призму своего субъективного восприятия. Для того чтобы запустить процесс формирования единого образа города нужна единая карта когнитивного восприятия, что представлена *путями*. *Путь* объединяет *точки*, превращая разрозненные компоненты городской идентичности в единую нарративную историю города. Такой нарратив и есть сформированный бренд города, несущий и транслирующий городские ценности (рис. 1).

Модель идентичности города представляет трехуровневую структуру, где нижним (базовым) уровнем является «*поле*», состоящее из всех элементов культурного ландшафта города; следующий уровень – «*точки*», знаковые элементы города, позитивно воспринимаемые горожанином и являющиеся проявленным образом части культурного ландшафта; и третий уровень – «*пути*», физические или ментальные связи

между «*точками*», формирующие единый образный нарратив города, воспринимаемый как его проявленная идентичность. Модель отражает не только иерархию компонентов идентичности города, но и стадийность анализа городского контекста при формировании концепции бренда города.

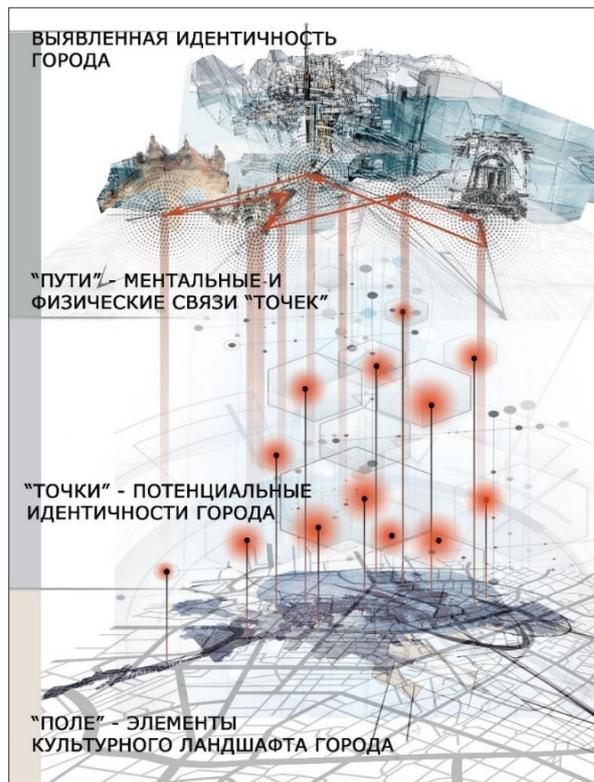


Рис. 1. Модель идентичности города

Компоненты поля культурного ландшафта города. *Точками*, компонентами идентичности города или доминирующими компонентами *поля культурного ландшафта* города, могут быть следующие компоненты города:

1. *Архитектурные и градостроительные объекты культурного наследия города.*

Согласно Федеральному закону от 25.06.2002 № 73-ФЗ об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации [29] к этой обширной группе компонентов относятся городские объекты, возникшие в результате исторических событий, представляющие собой ценность с точки зрения истории, археологии, архитектуры, градостроительства, искусства, науки и техники, эстетики, этнологии или антропологии, социальной культуры и являющиеся свидетельством эпох и цивилизаций, подлинными источниками информации о зарождении и развитии культуры:

– объекты археологического наследия (городища, курганы, грунтовые могильники, древние погребения или целые некрополи, селища, стоянки, каменные изваяния, стелы, наскальные

изображения, остатки древних укреплений, производств, каналов, судов, дорог, места совершения древних религиозных обрядов, отнесенные к объектам археологического наследия культурные слои).

– памятники архитектуры (отдельные постройки, здания и сооружения с исторически сложившимися территориями фортификационного, дворцового, жилого, общественного, административного, торгового, производственного, научного, учебного, религиозного назначения, а также мавзолей и мемориальные кварталы)

– произведения декоративно-монументального искусства

– ансамбли, или средовые памятники архитектуры (четко локализуемые на исторически сложившихся территориях группы изолированных или объединенных памятников, строений и сооружений)

– фрагменты исторических планировок и застроек поселений

2. *Выдающаяся архитектура, соотнесенная ко времени новейшей (актуальной) архитектуры или «contemporary architecture»* [30] (знаковые объекты современной архитектуры)

В контексте философской парадигмы Традиции и Современности, а также опираясь на работы, затрагивающие тему смены парадигмы мышления и осознания в периодизации архитектуры и градостроительства, таких ученых как Никоса Салингароса [31], С.О. Хан-Магамедова [32], И.А. Добричиной [33], в данной статье к новейшей (актуальной) архитектуре или «contemporary architecture» относится период с 70-х годов XX века и до сегодняшнего дня. Данная периодизация обусловлена тем, что до указанного временного рубежа в архитектуре и градостроительстве прослеживаются отчетливые эпохи, каждая из которых характеризуется собственным набором устоявшихся принципов, категорий и определенным отношением к традиционной, платоновской эстетике. Даже модернизм сохранял прямую взаимосвязь с традицией, пусть и как ее отрицание и антиэстетика. В настоящее время архитектура модернизма все чаще рассматривается в качестве самостоятельной исторической эпохи, а ее объекты признаются памятниками архитектуры, требующими сохранения [34].

К новейшей архитектуре относится не только постмодернизм как конкретный стиль, но и все современные течения, объединяемые общим признаком отрицания традиции как результат крайнего индивидуализма, решительного отказа от любых абсолютных категорий и их формальных признаков [30].

3. *Достопримечательные места - творения, созданные человеком, или совместные творения человека и природы* (рукотворные гроты, водопады, особые спуски и лестницы, видовые тропы и подъемы и т.д.)

4. *Места традиционного бытования народных художественных промыслов*

5. *Ореолы традиционных промысловых видов деятельности* (деятельность, непосредственно связанная с природной экосистемой города или около города; примером подобных ореолов могут быть традиционные рыбацкие пристани, охотничьи угодья, места произрастания и заготовки целебных трав и прочее)

6. *Особые виды деятельности города, а также места, связанные с ней, продукты этой деятельности* (уникальные промышленные производства, особая концентрация и качество культурной деятельности города, концентрация инновационно-креативной интеллектуальной деятельности)

7. *Особые культурные аспекты города и самобытные элементы* (традиции, празднования, символика, орнаментика, фольклор, национальная кухня)

8. *Персоналии города*

9. *Исторические события* (фактические и вымышленные – мифы, легенды, сказания, былины и т.д.)

10. *Сакральные места* (священные рощи, места силы, энергетические центры, духовные центры и т.д.)

11. *Рукотворные ландшафтные элементы города* (парки, скверы, аллеи, бульвары, сады и пр.)

12. *Природные ландшафтные артефакты* (горы, леса, степи, река, водопады, урочища и пр.)

13. *Особенности градостроительной структуры города* (особая квартальная, радиальная, иррациональная и пр. городская структура)

14. *Особая флора и фауна* (особые растения, животные, эндемики)

15. *Природные артефакты города* (особые природные компоненты почвы, грунта, ископаемые, состав воды и т.д.)

16. *Особые географические и климатические особенности города*

Векторы интенсивности характеристик компонентов культурного ландшафта. Компоненты культурного ландшафта города многообразны и неоднородны по своим параметрам. Возможно разложить все компоненты на 3 основных вектора интенсивности их характеристик по следующим направлениям:

– по степени историчности происхождения

Одни компоненты связаны с историей зарождения города, как например материальные следы влияния первобытных культур на формирование городского поселения в виде археологических *пластов* города, остатков поселений древних культур. Другие – являются элементами современной культуры города, но также являются уникальными и идентичными для города компонентами. Примерами, таких компонентов может быть знаковая современная архитектура (высотки Нью-Йорка, Центр современного искусства в Бильбао, Эйфелева башня Парижа и пр.). Таким образом этот вектор компонентов выстраивается по принципу временного вектора от древнейших эпох до современности [35].

– по степени пространственной локализации компонента в городе

Компоненты могут варьироваться по степени включенности численности объектов в свое образование от «*монообъекта*» (объект монументально-декоративного искусства, отдельно стоящее здание или строение и т.д.) и до градостроительных ансамблей, комплексов и кластеров.

– по степени материальности

Компоненты могут присутствовать в пространстве города как вполне четко обозримые материальные объекты. Таковыми, к примеру, являются объекты культурного наследия города. Это все что имеет четкую локализацию, ее материальное воплощение в виде сооружения с физически измеряемыми параметрами. Такие компоненты не составляет сложности соотнести с географической картой города – у них есть определенные пространственно-географические координаты.

И существуют компоненты, которые только опосредованно можно соотнести с пространственно-географической картой города. К таким компонентам можно отнести элементы самобытной культуры населения города – народные танцы, песни, ремесла и прочий фольклор. Степень локализации в городе таких компонентов может быть только опосредована, через ментально-символическую связь с конкретными локациями города. Примером такой «*привязки*» могут быть места проведения в городе народных гуляний, площадки для демонстрации народных сценических искусств, центры и дома народного творчества, территории, связанные с ореолами традиционных промыслов и прочее. Так или иначе для компонентов, связанных с особыми видами деятельности населения города, производственного, творческого, интеллектуального и прочего характера, необходима территория «*вмещения*» этой деятельности. Даже если это «*дея-*

тельность» может носить рассредоточенный характер локализации в городе (музыкально-танцевальная деятельность, как пример), его можно обозначить на географической карте города как «*плеядное скопление*», подобно астрономическому явлению рассеянных звездных скоплений, вязанных гравитационно и включающих облака газа и пыли.

Связанность подобных компонентов с локациями города может осуществляться через верникулярные названия, городские легенды и мифы, и соответствующими им пространственные городские «*вместилища*». Так неформальными центрами танца или народного музыкально-песенного искусства могут быть уличные площади, кафе, бары и рестораны, а профанная архитектура обретает ореол символизма и элемент сакральности благодаря городским легендам и мифам.

Таким образом, вектор степени материальности обозначает степень «*наглядности*» связи ценностно-символического аспекта компонента и его материального воплощения.

Для формирования матрицы компонентов идентичности города необходимо учитывать одновременность значения всех характеристик по вышеизложенным трем векторам.

Важно учитывать, что каждый из представленных компонентов возможно соотнести с пространственно-географической картой города. Такая возможность дает основу для будущей пространственной стратегии развития города. Каждый компонент культурного ландшафта города, представленный как *точка* объемной 3D матрицы компонентов идентичности города с векторами *историчности, материальности, пространственной локализации*, в своем потенциале несет возможность быть элементом идентичности города. Одномоментно все компоненты не могут быть идентичностью города, так как идентичность подразумевает выделение особенного единичного главного основного из *поля* множества. Такой подход основан на перцептивной сегрегации восприятия [36]: когда взгляд направлен на объект, то соседние с ним объекты становятся фоном, воспринимаются относительно однородными и без ярко выраженных характеристик, как бы в «размытом» виде. Человек способен переключать внимание с одного объекта на другой. Тогда то, что было фоном, становится ярко выраженным объектом. Таким образом, идентичность – это то, что по средством фокусировки через выстраивания *путей* связи нарратива восприятия и локализации через материализацию духовно-ценностных характеристик компо-

нента культурного ландшафта, становится *объектом* фокусирования «интенсификации» восприятия.

Выводы. Исследования в области культурного ландшафта, городской идентичности и территориального брендинга идут параллельными исследовательскими треками все больше расширяя и развивая методологические базы и подходы каждый в своей сфере. Вводятся новые термины и определения, зачастую дублируя уже существующие в смежной области. Многие аспекты в данных направлениях синонимичны в своих основных понятиях.

Интегрирование таких понятий как культурного ландшафта, городской идентичности и территориального брендинга и накопленной базы научного знания в этих исследовательских направлениях в единую взаимосвязанную систему, позволило увидеть возможность создания единой модели работы в области стратегии городского развития.

Описанная модель позволит взаимно увязывать термины и понятия, дает возможность общего целостного подхода к городской территории. Данное исследование открывает области для дальнейшего формирования единого подхода в области стратегии развития города. На основе этой модели может быть уточнена и сформирована единая матрица культурного ландшафта города, что позволит:

- определить унифицированные компоненты культурного ландшафта города, требующие для рассмотрения при формировании стратегии развития города;
- определить «сильные стороны» городской идентичности как потенциальных точек роста города;
- сформировать каркас связей, физических и ментальных, знаковых территорий города как базовых кластерных территорий города для развития.
- сформировать единое основание для работы различных специалистов в области территориального планирования, стратегирования и развития городов.

Все компоненты матрицы компонентов культурного ландшафта города соотносятся с подходами в градостроительной науке через свою привязку к конкретным территориям. Это дает основание для дальнейшей цифровизации предложенной модели. Каждому из представленных компонентов возможно прописать алгоритмы поиска в базе *big data* с дальнейшей привязкой и отображением на карте города.

Особенно актуальна данная модель для малых городов. Набор компонентов идентичности

крупного города, особенно мегаполиса, пропорционально больше увеличению численности и размеров города. Крупный город в силу своего масштаба и образного охвата делится на большее количество верникулярных районов, которые в свою очередь тяготеют к самостоятельной целостной и более не зависимой от других частей города образности. Крупный город как бы «рассыпается» на отдельные «протогорода» со своими наборами компонентов идентичности. Малый город имеет преимущество целостности и более четкой артикулируемости своей идентичности. Малый город предлагает «определенный» набор ценностей, крупный - разнообразие, порой очень противоречивое. И в данном случае, для малого города это становится преимуществом и ресурсом для его дальнейшего развития.

Одна из причин оттока население в более крупные города – это то, что крупный город предоставляет «возможности», порой которыми не каждый приезжий может воспользоваться. Малый город, в этом плане не обладает таким ресурсом. Но малый город может предложить не «возможности», а конкретную, понятную и порой даже осязаемую (в виде уникальной продукции, исторических артефактах, уникальных природных условиях и прочее) «ценность», выраженную через бренд города свою идентичность.

Модель идентичности города становится ресурсом для активации своего потенциала малого города, своих преимуществ перед более крупным городом. И в условиях формирования агломераций с сильными центрами и оттоком экономических и человеческих ресурсов из малых городов это может стать действующим инструментом для убывающих городов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горнова Г.В. Городская идентичность: философско-антропологические основания. Омск: «Амфора», 2019. 167 с.
2. Башкортостанстат. Краткие итоги Всероссийской переписи населения 2020 года по муниципальным районам и городским округам Республики Башкортостан: статистический бюллетень. Уфа: Башкортостанстат, 2023. 130 с.
3. Каганский В.Л. Культурный ландшафт и советское обитаемое пространство. М.: Новое литературное обозрение, 2001. 576 с.
4. Каганский В.Л. Культурный ландшафт: основные концепции в российской географии // Обсерватория культуры. 2009. №1. С. 62–70.
5. Лавренова О. А. Семантика культурного ландшафта: от географических образов к знакам // Философия и культура. 2010. №12. С. 63–72.

6. Горнова Г.В. Феномен города в духовном мире человека: автореферат дис. ... кандидата философских наук: 09.00.13 / Ом. гос. пед. ун-т. Омск, 2005. 18 с.
7. Горнова Г.В. Коллективная память и практики коммеморации в формировании городской идентичности // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. 2017. №2 (15). С. 18–21.
8. Головнёва Е.В. Региональная идентичность как форма коллективной идентичности и ее структура // Лабиринт. 2013. № 5. С. 42–50.
9. Головнёва Е.В. Конструирование региональной идентичности в современной культуре: на материале Сибирского региона: автореферат дис. ... доктора философских наук : 09.00.13 / Головнёва Елена Валентиновна; [Место защиты: Ом. гос. пед. ун-т]. Екатеринбург, 2018. 38 с.
10. Шматко Н.А., Качанов Ю.Л. Территориальная идентичность как предмет социологического исследования // Социологические исследования. 1998. №4. С. 94.
11. Самошкина И.С. Территориальная идентичность как предмет социально-психологического исследования // Вестник РГГУ. 2008. №3. С. 43–53.
12. Манаков А.Г. Геокультурное пространство северо-запада Русской равнины: динамика, структура, иерархия. Псков: Центр «Возрождения», 2002. 300 с.
13. Микляева А.В. Городская идентичность жителя современного мегаполиса. Ресурс личного благополучия или зона повышенного риска? М.: Речь, 2011. 160 с.
14. Линч К. Образ города. М.: Стройиздат, 1982. 328 с.
15. Руссо А. Черные страницы национального прошлого. Послевоенная история и историческая память. М.: Прогресс-Культура, 1995. С. 217–232.
16. Ассман Я. Культурная память: письмо, память о прошлом и политическая идентичность в высоких культурах древности. Москва: Языки славянской культуры, 2004. 363 с.
17. Динни К. Брендинг территорий. Лучшие мировые практики. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 336 с.
18. Родькин П.Е. Брендинг территорий: городская идентичность и дизайн. Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2020. 93 с.
19. Визгалов Д.В. Брендинг города. Изд. Институт экономики города, 2011. 160 с.
20. Sauer C.O. The Morphology of Landscape. University of California press, 1925. 53 p.
21. Скалкин А.А. Понятие идентичности и факторы ее формирования // Architecture and Modern Information Technologies. 2017. №41(4). С. 57–67.
22. Воробьева И.В., Кружкова О.В. Психология городской среды. Изд. РГППУ, 2012. 243 с.
23. Петровский А.В., Ярошевский М.Г. Психология. М.: Академия, 2005. 501 с.
24. Менегетти А. Мир образов: краткое пособие по интерпретации образов и сновидений. М.: ННБФ «Онтопсихология», 2005. 224 с.
25. Федоров В.В., Коваль И.М. Мифосимволизм архитектуры. М.: КомКнига, 2006. 208 с.
26. Юнг К. Архетип и коллективное бессознательное. М.: АСТ, 2023. 224 с.
27. Юнг К. О психологии бессознательного. М.: АСТ, 2021. 224 с.
28. Шапкина Ю.В. Брендинг городов: особенности формирования бренда города // Альманах теоретических и прикладных исследований рекламы. 2011. №1. С.46–53.
29. Российская Федерация. Закон. Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации: федеральный закон: (собрание законодательства Российской Федерации, 2002, № 26, ст. 2519). [3-е изд.]. Москва: Ось-89, 2008. 63с.
30. Бембель И.О. «Суперстили» и периодизация в архитектуре // Academia. Архитектура и строительство. 2018. №4. С. 29–34.
31. Салингарос Н. Анти-архитектура и деконструкция. Триумф нигилизма. Москва, Екатеринбург: Кабинетный ученый, 2017. 296 с.
32. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. М.: Стройиздат, 2001. 712 с.
33. Добрицина И.А. От постмодернизма – к нелинейной архитектуре. Архитектура в контексте современной философии и науки. М.: Прогресс-Традиция, 2004. 416 с.
34. Фахрутдинова И.А. и Ефимова Д. Д. Архитектура общественных зданий периода советского модернизма как актуальная тема исследования регионального наследия (60-80 гг. 20 века) // Известия КазГАСУ. 2016. № 2(36). С. 64–71.
35. Фирсова О.Л., Шестопалова Л.В. О термине «культурные ценности» в сфере сохранения культурного наследия. М.: Институт Наследия, 2022. 92 с.
36. Гамезо М.В., Герасимова В.С., Машурцева Д.А., Орлова Л.М. Общая психология. Москва: Ось-89, 2007. 352 с.
37. Баксанский О.Е. Когнитивные репрезентации: обыденные, социальные, научные. М.: URSS, 2009. 220 с.

Информация об авторах

Ишмухаметова Ксения Валерьевна, аспирант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: ikv23@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Баймуратова Светлана Хамитовна, кандидат архитектуры; профессор кафедры Архитектура. E-mail: bjashka-s@mail.ru Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1. Доцент кафедры Градостроительства. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.06.2025 г.

© Ишмухаметова К.В., Баймуратова С.Х., 2026

^{1,2}.**Ishmukhametova K.V.*, ^{1,2}*Baymuratova S.Kh.*

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

²*Ufa State Petroleum Technological University*

*E-mail: ikv23@mail.ru

IDENTITY AS A RESOURCE FOR THE DEVELOPMENT OF SMALL TOWNS IN THE CONTEXT OF AGGLOMERATION PROCESSES

Abstract. *In the context of agglomeration processes and the increasing share of influence in the formation of the agglomerate of large cities, small towns lose the opportunity for further development and prosperity. The process of identifying and emphasizing urban identity is a resource for the full-fledged comprehensive development of the city.*

The article discusses such concepts as cultural landscape, urban identity and territorial branding. By defining the points of relationship between these concepts, the authors of the article form a model of urban identity. The authors introduce concepts such as "field", "paths" and "points", which represent the basic elements of the model design. The levels of the model reflect not only the hierarchy of interrelationships of all components of urban identity, but also the stages of analysis of the context of the city.

The authors of the article focus on the components of the cultural landscape, describe them and propose to consider these components as spatial territorial objects with possible reference to a specific location of the city. This approach makes it possible to consider the cultural landscape not only from the perspective of the humanities, but also as part of the city's spatial development strategy. The model presented in the article makes it possible to compare the conceptual areas of the terms "cultural landscape", "identity", "branding" of a city from social, economic, geographical, urban planning and other sciences, to identify elements of their synonymy, similarity and complementarity.

Keywords: *cultural landscape, urban identity, branding of the territory, image of the city, urban development strategy.*

REFERENCES

1. Gornova G.V. The phenomenon of the city in the spiritual world of man [Fenomen goroda v duhovnom mire cheloveka]: abstract of the dissertation of the Candidate of Philosophical Sciences: 09.00.13 / Omsk State Pedagogical University. un-T. Omsk, 2005. 18 p. (rus)
2. Bashkortostan State Statistics Service. Summary results of the 2020 All-Russian Population Census for municipal districts and urban districts of the Republic of Bashkortostan: statistical bulletin [Bashkortostanstat. Kratkie itogi Vserossijskoj perepisi naseleniya 2020 goda po municipal'nym rajonam i gorodskim okrugam Respubliki Bashkortostan: statisticheskij byulleten']. Ufa: Bashkortostan State Statistical Office, 130 p. (rus)
3. Kagansky V. L. Cultural landscape and Soviet habitable space [Kul'turnyj landshaft i sovetskoe obitaemoe prostranstvo]. Moscow: New Literary Review, 2001. 576 p. (rus)
4. Kagansky V.L. Cultural landscape: basic concepts in Russian geography [Kul'turnyj landshaft: osnovnye koncepcii rossijskoj geografii]. Observatory of Culture. 2009. No.1. Pp. 62–70. (rus)
5. Lavrenova O.A. The semantics of the cultural landscape: from geographical images to signs [Semantika kul'turnogo landshafta: ot geograficheskikh obrazov k znakam]. Philosophy and Culture. 2010. No.12. Pp. 63–72. (rus)
6. Gornova G.V. Urban identity: philosophical and anthropological foundations [Gorodskaya identichnost': filosofsko-antropologicheskie osnovaniya]. Omsk: Publishing house "Amphora", 2019. 167 p. (rus)

7. Gornova G.V. Collective memory and the practice of commemoration in the formation of urban identity // Bulletin of Omsk State Pedagogical University. Humanitarian studies. 2017. No.2 (15). Pp. 18–21. (rus)
8. Golovneva E.V. Regional identity as a form of collective identity and its structure [Regional'naya identichnost' kak forma kollektivnoj identichnosti i ee struktura]. Labyrinth. 2013. No.5. Pp. 42–50. (rus)
9. Golovneva E.V. Constructing regional identity in modern culture: based on the material of the Siberian region [Konstruirovaniye regional'noj identichnosti v sovremennoj kul'ture: na materiale Sibirskogo regiona]: abstract of the dissertation... Doctor of Philosophy : 09.00.13 / Golovneva Elena Valentinovna; [Place of defense: Omsk State Pedagogical University university]. Yekaterinburg, 2018. 38 p. (rus)
10. Shmatko N.A., Kachanov Y.L. Territorial identity as a subject of sociological research [Territorial'naya identichnost' kak predmet sociologicheskogo issledovaniya]. Sociological Research. 1998. No. 4. P. 94. (rus)
11. Samoshkina I.S. Territorial identity as a subject of socio-psychological research [Territorial'naya identichnost' kak predmet social'no-psichologicheskogo issledovaniya]. Bulletin of the Russian State University. 2008. No.3. Pp. 43–53. (rus)
12. Manakov A.G. The geocultural space of the north-west of the Russian Plain: dynamics, structure, hierarchy [Geokul'turnoe prostranstvo severo-zapada Russkoj ravniny: dinamika, struktura, ierarhiya]. Pskov: Renaissance Center, 2002. 300 p. (rus)
13. Miklyaeva A.V. The urban identity of a resident of a modern metropolis. A resource for personal well-being or a high-risk area? Moscow: Speech, 2011. 160 p.
14. Lynch K. The image of the city. Moscow: Stroyizdat, 1982. 328 p.
15. Rousseau A. The Black Pages of the National Past. Post-war history and historical memory. Moscow: Progress-Kultura, 1995 Pp. 217–232.
16. Assman I. Cultural memory: writing, memory of the past and political identity in the high cultures of antiquity. Moscow: Languages of Slavic culture, 2004. 363 p.
17. Dinny K. Branding of territories. The best world practices. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber, 2013. 336 p.
18. Rodkin P.E. Branding of territories: urban identity and design. Moscow-Berlin: Direct Media, 2020. 93 p.
19. Vizgalov D.V. Branding of the city. Ed. Institute of City Economics, 2011. 160 p.
20. Sauer C.O. The Morphology of Landscape. University of California press, 1925. 53 p.
21. Skalkin A.A. The concept of identity and the factors of its formation [Ponyatie identichnosti i faktory ee formirovaniya]. Architecture and Modern Information Technologies. 2017. No.41 (4). Pp. 57–67. (rus)
22. Vorobyova I.V., Kruzhkova O.V. Psychology of the urban environment. RGPPU Publishing House, 2012. 243 p.
23. Petrovsky A.V., Yaroshevsky M.G. Psychology. Moscow: Akademiya, 2005. 501 p.
24. Meneghetti A. The World of images: a short guide to the interpretation of images and dreams. Moscow: NNBF "Ontopsychology", 2005. 224 p.
25. Fedorov V.V., Koval I.M. The mythosymbolism of architecture [Metasimvolizm arhitektury]. Moscow: KomKniga, 2006. 208 p. (rus)
26. Jung K. The archetype and the collective unconscious. Moscow: AST, 2023. 224 p.
27. Jung K. About the psychology of the unconscious. Moscow: AST, 2021. 224 p.
28. Shapkina Yu.V. Branding of cities: features of the formation of the city brand [Breeding gorodov: osobennosti formirovaniya brenda goroda]. Almanac of Theoretical and Applied Advertising Research. 2011. No.1. Pp. 46–53. (rus)
29. Federal Law on Cultural Heritage Sites (Historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation [Federal'nyj zakon ob ob'ektah kul'turnogo naslediya (pamyatniki istorii i kul'tury) narodov Rossijskoj federacii]. Moscow: Os-89, 2008. 63 p. (rus)
30. Bembel I.O. "Superstyles" and periodization in architecture [«Superstili» i periodizaciya v arhitekture]. Academia. Architecture and Construction. 2018. No.4. Pp. 29–34. (rus)
31. Salingaros N. Anti-architecture and deconstruction. The triumph of nihilism. Moscow, Yekaterinburg: Cabinet Scientist, 2017. 296 p.
32. Khan-Magomedov S. O. The architecture of the Soviet avant-garde [Arhitektura sovetskogo avangarda]. Moscow: Stroyizdat, 2001. 712 p. (rus)
33. Dobritsina I.A. From postmodernism to nonlinear architecture. Architecture in the context of modern philosophy and science [Ot postmodernizma – k nelinejnoj arhitekture. Arhitektura v kontekste sovremennoj filosofii i nauki]. Moscow: Progress-Tradition, 2004. 416 p. (rus)
34. Fakhrutdinova I.A., Efimova D.D. Architecture of public buildings of the period of Soviet Modernism as an actual topic of research of regional heritage (60–80 years 20th century) [Arhitektura obshchestvennyh zdaniy perioda sovetskogo modernizma kak aktual'naya tema issledovaniya regional'nogo naslediya (60–80 gg. 20 veka)]. News of KazGASU. 2016. No.36(2). Pp. 64–71. (rus)
35. Firsova O.L., Shestopalova L.V. About the term "cultural values" in the field of cultural heritage preservation [O termine «kul'turnye cennosti» v

sfere sohraneniya kul'turnogo naslediya]. Moscow: Institute of Heritage, 2022. 92 p. (rus)

36. Gamezo M.V., Gerasimova B.C., Mashurtseva D.A., Orlova L.M. General psychology. Moscow: Os-89, 2007. 352 p.

37. Baksansky O.E. Cognitive representations: everyday, social, scientific [Kognitivnye reprezentacii: obydennye, social'nye, nauchnye]. Moscow: URSS Publishing House, 2009. 220 p. (rus)

Information about the authors

Ishmukhametova, Ksenia V. Senior lecturer. Postgraduate student. E-mail: ikv23@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46; Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1.

Baymuratova, Svetlana Kh. PhD in Architecture. Professor E-mail: bjashka-s@mail.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov st., 1; associate professor Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.06.2025

Для цитирования:

Ишмухаметова К.В., Баймуратова С.Х. Идентичность как ресурс развития малых городов в контексте агломерационных процессов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 39–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-39-51

For citation:

Ishmukhametova K.V., Baymuratova S.Kh. Identity as a resource for the development of small towns in the context of agglomeration processes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 39–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-39-51

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-52-60

Золотарева М.В., Ачковский И.А.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

*E-mail: goldmile@yandex.ru

КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ПАРКОВОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПРИМЕРЕ ЧИСТЯКОВСКОЙ РОЩИ В КРАСНОДАРЕ

Аннотация. В статье рассматривается концепция комплексного развития парковых территорий. Цель данного исследования заключается в разработке концепции комплексного развития Чистяковской рощи, и находящегося на его территории комплекса ВДНХ в Краснодаре. Центральное расположение парка является преимуществом, так как он может стать не только местом отдыха, но и культурным центром города. В качестве задач исследования были определены: анализ существующего состояния и проблематики парка Чистяковская роща во взаимосвязи с комплексом ВДНХ; разработка концептуальных подходов к развитию экологического, культурного и социального потенциалов территории; предложение мероприятий по улучшению функционального наполнения территории и социальной инклюзивности. Итогом работы стали основные положения концепции, определившей пути внедрения современных подходов, основанных на принципах устойчивого развития и природоохранных технологий. Предложенная концепция преобразования территории Чистяковской рощи направлена на создание уникального общественного пространства, которое объединяет историческое наследие и природный ландшафт, в этом контексте решено зонирование территории, включающее создание тематических зон, таких как агропромышленная выставка, экология, культура и туризм, с акцентом на экологическую устойчивость и современные требования к общественным пространствам.

Ключевые слова: Краснодар, Чистяковская роща, общественные территории, комплексное развитие, природная среда, урбанизированная среда.

Введение. В условиях стремительного роста урбанизации и значительных изменений в городской среде особенно важным становится вопрос комплексного развития природных территорий, находящихся в структуре города [1]. Чистяковская роща в Краснодаре – это одна из центральных, не только парковых зон, но прежде всего общественных пространств. Чистяковская роща и входящая в ее состав территория ВДНХ, в разное время являлись точкой притяжения жителей и гостей города. Цель исследования – создать концепцию развития этой парковой зоны с находящимися на ней объектами, представляющими историко-культурное значение. Эта концепция учитывает особенности природного контекста и социально-культурной составляющей преобразования которых, путем ревитализации и реконструкции, выведет эту зону на новый уровень устойчивого развития. Главной задачей становится, через раскрытие потенциала многофункционального развития территории, гармонично сочетать экосистемы парка, антропогенную среду, в его составе и городские территории. В итоге ожидается создание концепции, которая обеспечит долгосрочное развитие Чистяковской рощи, сохраняя ее природное богатство и повышая привлекательность для жителей и гостей Краснодара. [2]

Следует отметить, что Чистяковская роща имеет богатую историю. В 1900 году Городская

Дума Краснодара вынесла решение о выделении значительного участка земли – 30 десятин под создание городской рощи [3]. Идея создания лесопарковой зоны возникла еще раньше, этот замысел должен был реализовать потребности растущего города в зеленых насаждениях. Название же роще суждено было носить имя градоначальника Гавриила Степановича Чистякова, инициатора и вдохновителя этого масштабного проекта озеленения городских территорий. Градоначальник, не ограничился лишь административными решениями, а лично принимал участие в посадке деревьев, вместе с жителями города. В 1923 году в эпоху коренных социальных и политических перемен, роща получила название Первомайской, отражая новые идеологические направления.

В 1952 году, на восточной окраине Первомайской рощи, со стороны улицы Московской, Краснодарский крайисполком выделил под строительство участок земли – двенадцать гектаров. Это решение заложило основу для грандиозного проекта создания краевой выставки достижений народного хозяйства (ВДНХ) аналога знаменитой московской выставки. Строительство велось стремительными темпами, и всего за два года к концу 1957 года, на выделенном участке возник уникальный и впечатляющий архитектурный ансамбль. В короткий срок возвели двадцать семь отдельных выставочных павильонов, каждый из

которых имел свои архитектурные особенности, отражая специфику определенных отраслей сельского хозяйства или промышленности Краснодарского края [4]. При этом ни одно из зданий не повторялось. Центральным элементом комплекса стала величественная колоннада, украшенная скульптурными композициями, изображающими тружеников села – механизатора и колхозницу, воплощающего идеал советского человека, создателя и героя труда. Архитектурное решение выставки, включая колоннаду, павильон и фонтан, было намеренно выдержано в стилистике московской ВДНХ, что подчеркивало преемственность и масштаб замысла выставки. ВДНХ стала гордостью Краснодара и всего региона. На ней представляли свою продукцию ведущие колхозы и совхозы со всего Краснодарского края. Находясь раньше на окраине города, Чистяковская роцца в настоящее время является одним из центральных парков города. С 1981 года комплекс ВДНХ является памятником культурного наследия, несмотря на это павильоны стоят разрушенными, хотя есть прекрасный опыт создания общественного пространства на основе восстановленной выставки народного хозяйства в Рязани.

Материалы и методы. Исследование базируется на натурном обследовании территории, позволяющем проанализировать существующую градостроительную ситуацию в Краснодаре; на изучении генеральных и ситуационных планов, архивных документов, фотографий и карт [5], для выявления проблем и потенциала парковых территорий Чистяковской роцци и ВДНХ. Метод сравнительного анализа примеров мировой практики комплексного развития парковых территорий позволил определить специфику и пути достижения успешной связи между градостроительной и экологической политикой в контексте зеленой инфраструктуры. Обобщение теоретических работ в области ландшафтно-градостроительного проектирования позволило определить базовые основы методов работы с природными объектами в структуре города, с акцентом на использование парковых зон как рекреационных и экологических элементов [6]. Кроме этого, были проведены исследования подходов в области экологического планирования для оптимизации использования парковых пространств и их интеграции в городскую среду. Был проведен анализ нормативно-правовой и научной литературы по охране природных территорий и экологическому строительству с целью разработки градостроительного зонирования для устойчивого развития парков и зеленых зон в Краснодаре.

Основная часть. Исходя из краткой исторической справки и проведенного ландшафтного и

объемно-пространственного анализа был сделан вывод, что Чистяковская роцца во взаимосвязи с комплексом ВДНХ обладает особым потенциалом для интегрированного развития, учитывая ее ландшафтные характеристики, удобное расположение, и возможности для многофункционального использования. При этом важно учесть уникальные характеристики каждого участка и адаптировать проекты под конкретные потребности города и его жителей [7].

SWOT анализ территории Чистяковской роцци невозможно рассматривать без контекста проблем города Краснодара [8]. В связи с этим были выявлены четыре группы факторов внутренней и внешней среды, влияющих на развитие исследуемой территории (табл. 1).

Изучив контекст и характеристики территории Чистяковской роцци в контексте Краснодара, можно сделать вывод о ее большом историко-культурном и природном потенциале, являющейся основой для развития и модернизации территории. Она расположена в центре города, что предполагает удобный доступ и привлекательность для широкого круга посетителей. Парк как центральный элемент территории может стать ключевым фактором в привлечении местных жителей и туристов, что делает его реконструкцию и ревитализацию важным шагом для улучшения общего городского пространства [9]. Историко-культурное значение территории позволяет акцентировать ее роль как исторического природно-ландшафтного наследия [10].

Проект благоустройства территории Чистяковской роцци в Краснодаре разработан с учётом, как её исторической значимости, так и современных требований к формированию устойчивой ландшафтно-урбанизированной городской среды [11]. Главная цель исследования заключается в концепции создания многофункционального общественного пространства, которое не только обеспечивает комфортное пребывание горожан, но и выполняет важную культурную, образовательную и экологическую роль (рис. 2).

Объединяющей идеей стало название комплекса природно-урбанизированной территории: «Перекрёсток эпох», которое позволяет переосмыслить историческую территорию выставки ВДНХ Краснодар и интегрировать её в современный городской контекст через восстановление и функциональное наполнение существующих павильонов, а также гармоничное взаимодействие с природным ландшафтом роцци [12]. Таким образом, концепция реконструкции и ревитализации Чистяковской роцци и комплекса ВДНХ представляет собой следующие положения.

Таблица 1

SWOT-анализ территории Чистяковской рощи и ВДНХ в Краснодаре

<p>Сильные стороны</p> <ul style="list-style-type: none"> • Стратегическое расположение Краснодара в центре Кубанской низменности, делает его важным элементом природного и транспортного коридора. • Наличие разнообразных природных зон на территории города и окрестностей, включая леса, парки, водоемы и рекреационные зоны. • Традиционно богатая флора и фауна, особенно вблизи рек Кубань и Лаба, что дает потенциал для создания новых экологически устойчивых рекреационных зон. • Возможности для развития экологического туризма на базе природных объектов, одним из которых является Чистяковская роща. • Возможности развитая гидрологической сети рек, каналов и прудов, что дает шанс для создания водно-зеленого каркаса с включением в него экосистемы Чистяковской рощи. 	<p>Слабые стороны</p> <ul style="list-style-type: none"> • Высокая плотность автомобильного движения и недостаток парковочных мест, особенно в центральных районах города. • Ограниченность общественного транспорта и отсутствие достаточно развитой сети экологического транспорта, в том числе велосипедных дорожек. • Проблемы с инфраструктурой в новых жилых районах и пригородах, нехватка социальных объектов и общественных зон. • Недостаток инвестиций в улучшение городской экологической инфраструктуры, в том числе в развитие парков и рекреационных территорий
<p>Возможности</p>	<p>Угрозы</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Чистяковская роща на ВДНХ обладает особым потенциалом для интегрированного градостроительного развития. • Удобное расположением, и возможность для полифункционального использования в русле культурного и ландшафтно-рекреационного развития. • Обладает возможностью проводить адаптацию территории под конкретные потребности города и его жителей. 	<ul style="list-style-type: none"> • Наличие высокого уровня общего загрязнения воздуха и шума из-за интенсивного движения транспорта. • Недостаток зеленых насаждений и общественных пространств для отдыха. • Ухудшение экологической ситуации и сокращение зеленых зон для отдыха горожан. • Уменьшение количества объектов социальной инфраструктуры и условий для комфортного отдыха и проведения досуга жителей.



МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ

Для каждой зоны можно продумать несколько вариантов использования и событийного наполнения, чтобы максимально разнообразить впечатления и обеспечить гибкость в зависимости от потребностей разных посетителей. Это позволит не только адаптировать пространство под различные мероприятия



ПРОЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО КУЛЬТУРНОГО КОНТЕКСТА

В новых элементах среды можно органично вплести историю места и воспоминания местных жителей, создавая уникальную атмосферу, тесно связанную с прошлым. В каждой зоне или ячейке пространства будут присутствовать отсылки к нематериальному наследию квартала, такие как символы, архитектурные детали, декоративные элементы или даже определенные формы взаимодействия с



МАКСИМАЛЬНОЕ ОЗЕЛЕНЕНИЕ

Главная ценность парка заключается в озеленении, где высаживаются плодово-ягодные деревья, местные растения и цветы, создавая гармоничное пространство. Особое внимание уделяется принципу посадок, включая огородные грядки, сады и живописные дорожки, которые подчеркивают природную атмосферу и создают комфортные зоны для отдыха.



УДИВЛЕНИЕ И ТАКТИЛЬНОСТЬ

Высадка привычных видов растений, но выбираем необычные сорта, например, рябину с белыми ягодами. Озеленение приглашает к взаимодействию: можно вдыхать ароматы, собирать плоды, играть, наблюдать, трогать и учиться, а также заниматься выращиванием собственных растений.

Рис. 1. Теоретическая модель ревитализации Чистяковской рощи.

Разработано автором



Рис. 2. Вид на Чистяковскую рощу и территорию ВДНХ. Разработано автором



Рис. 3. Площадь перед главным корпусом ВДНХ в Краснодаре.
Предложение автора

1. Сохранение и восстановление исторических объектов ВДНХ Краснодар (рис. 3):

- Проведение реставрационных работ с учётом требований к объектам культурного наследия;

- Придание каждому павильону актуальной функции, соответствующей тематике выставки;

- Обеспечение визуальной и физической доступности исторических объектов для посетителей;

- Создание системы навигации и информирования о значении каждого объекта.

2. Формирование уникального тематического пространства – «Перекрёстка эпох» (рис. 4):

- Создание шести тематических зон: «Агропромышленность», «Технологии и инновации», «Строительство», «Экология», «Туризм и отдых», «Культура и искусство»;

- Каждая зона включает не только экспозиционные пространства, но и современные интерактивные и образовательные элементы;

- Объединение прошлого и настоящего через выставочную, просветительскую и художественную деятельность.

3. Интеграция культурно, образовательного и досугового функционала (рис. 5):

- Проектирование Культурного центра, включающего галереи, библиотеку, образовательные и творческие пространства;

- Организация площадок для лекций, мастер-классов, публичных мероприятий;

- Создание детских и спортивных зон, доступных для всех возрастов;

- Введение новых сценариев использования территории, включая событийные мероприятия.

4. Создание комфортной среды для всех возрастов и категорий населения:

- Разработка инклюзивной среды: обеспечение доступности для маломобильных групп, организация безопасных маршрутов, установка тактильной навигации;

- Многообразие зон отдыха: от тихих уединённых пространств до активных общественных площадок;

- Повышение уровня комфорта за счёт внедрения современных малых архитектурных форм, навесов, освещения, мест для сидения и отдыха.

5. Повышение уровня благоустройства при сохранении экосистемы рощи:

- Минимальное вмешательство в природный ландшафт рощи, сохранение многолетних деревьев;

- Организация экологических маршрутов – троп из природных материалов, велодорожек, мостиков;

- Внедрение систем дренажа и полива, способствующих сохранению зелёных насаждений;

- Формирование зоны «первозданной природы» – пространства для тишины, наблюдения за природой и отдыха без визуального и звукового шума.



Рис. 4. Тематическая зона «Экология»
Разработано автором



Рис. 5. Культурный центр (галерея, библиотека, образовательные и творческие пространства)
Разработано автором

Ландшафтно-дизайнерская концепция проекта благоустройства Чистяковской рощи направлена на создание эстетически выразительной, экологически устойчивой и функционально разнообразной среды [13]. Основная идея – гармоничное сосуществование природного ландшафта с архитектурными объектами, поддержание ощущения естественности и уюта, а также раскрытие темы «Перекрёстка эпох» через приёмы оформления и озеленения.

В настоящее время центром притяжения на территории Чистяковской рощи является спонтанно сложившийся книжный рынок. Концепция ревитализации парка предусматривает размещение культурного центра – архитектурного акцента в западной части парка вблизи с комплек-

сом ВДНХ. Корпуса культурного центра интегрированы в природную среду [14]. Все здания частично заглублены в рельеф и визуально «вырастают» из земли, что позволяет им сливаться с природной средой [15]. Кровли корпусов эксплуатируемые, с озеленением, дорожками, зонами отдыха, также они оборудованы смотровыми площадками. Архитектура каждого корпуса подчинена общей концепции: плавные формы, естественные материалы (камень, дерево, стекло), мягкие фасадные линии. Наряду с выставочными функциями здесь может разместиться организованная книжная торговля; библиотека с открытыми читальными залами, зонами coworking; образовательный центр (лектории, мастер-классы, семинары); центр творчества и ремесел (мастерские, арт-резиденции, курсы) [16].

Для полноценного функционирования парка Чистяковская роща в концепции учитывается создание высококачественной и продуманной инфраструктуры, которая обеспечит комфорт, безопасность и удобство функциональных общественных пространств для всех посетителей, а также поддержит устойчивость и долговечность функционирования парка [17].

Концепция «Перекрёсток эпох» предполагает органичное сочетание элементов, представляющих различные исторические и культурные слои, сохраняя преемственность и гармонию [18]. Предложенный подход к реконструкции и ревитализации Чистяковской рощи и зоны ВДНХ, является частью общей концепции, направленной на создание пространства, эффективно сочетающего в себе функциональность современного использования с глубоким пиететом к культурному и историческому наследию. Он основан на идеи объединяющей три важнейших временных аспекта: прошлое, настоящее и будущее, что подразумевает интеграцию ключевых объектов Чистяковской рощи, для создания единой динамичной и целостной среды.

Таким образом, первым аспектом в этом направлении является сохранение и реставрация историко-культурного наследия ВДНХ, концептуальное переосмысление роли этого явления, в процессе современной жизни, опирающегося на идею «временной интеграции». Также, это включает в себя выбор функционального наполнения, объектов, представляющих ушедшую эпоху. Выбор современного использования является важным этапом, который должен подчеркнуть такое понятие, как «дух места», не вступая с ним в противоречие [19].

Однако, концепция «временной интеграции» не ограничивается только «прошлым». Следующий, реализуемый аспект, назван условно «настоящее». Он включает в себя создание комфортных условий для досуга и отдыха горожан и гостей города. Это подразумевает формирование современной инфраструктуры обслуживания; удобные зоны, различной направленности для людей всех возрастов; качественное инженерное оборудование и т.п. Все это призвано обеспечить максимальный комфорт и удовлетворение потребностей разнообразной аудитории посетителей Чистяковской рощи и территории ВДНХ [20].

В перспективе концепция развития, рассматриваемой территории, ориентирована на будущее, на устойчивый контент и инновации. Это связано с созданием культурного центра, выполненного с применением современных био-инновационных технологий, экологически чистых материалов и энергоэффективных решений [21].

Строительство нового объекта предусматривает стремление к созданию экологически чистого и устойчивого пространства, которое обеспечивает применение новых зданий с травяным покрытием кровель, возобновляемых источников энергии. интеллектуальных систем управления энергопотреблением.

Выводы. Ревитализация и реконструкция парка в центре Краснодара с территориями ВДНХ предоставляет уникальную возможность создания современного общественного пространства, которое будет сочетать в себе элементы культурного наследия с инновационными и современными подходами. Выводы были сделаны на основе следующих положений:

1. Анализ исторического и природного капитала Краснодара показал, что ключевые зеленые территории города, такие как Чистяковская роща и территория ВДНХ, определил необходимость комплексного подхода к сохранению и развитию, с учетом их исторической и культурной ценности.

2. Проведенное исследование выявило потребность в новом подходе к развитию зеленых зон города, который сочетает сохранение культурного наследия с созданием комфортных условий для городской жизни.

3. Применение лучших практик по сохранению исторических объектов и развитию зеленых территорий из зарубежных и отечественных примеров позволило сформулировать основные принципы и инструменты преобразования этих территорий.

4. Предложена стратегия, включает восстановление и сохранение исторических объектов, создание многофункциональных рекреационных зон, повышение связности исторических и природных объектов, а также использование современных решений для улучшения качества городской среды.

5. Результаты работы могут быть использованы для создания стратегии комплексного развития парковых территорий в городе Краснодар, включая улучшение функциональности зеленых зон, повышение их доступности и устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барышникова О.Н., Козырева Ю.В. Основы ландшафтного планирования. Барнаул : Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2017. 216 с.
2. Жонузаков А.Э., Миразимова Г.У. Городские парки и некоторые вопросы ландшафтно-экологического аспекта // Academy. 2020. № 11 (62). С. 78–81.

3. Субботин О.С. Формирование историко-архитектурной среды г. Екатеринодара // Архитектура: Сборник научных трудов. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2024. С. 105–112. EDN ZUZWIZ.
4. Частиковская роща. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Чистяковская_роща (дата обращения 03.05.2025).
5. Хотко С.Х. Открытие Черкесии: картографические источники XIV–XIX вв. Майкоп: ОАО «Полиграф-ЮГ», 2015. 292 с.
6. Теория ландшафтной архитектуры и методология проектирования: краткий курс лекций / сост. О.В. Азарова // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». Саратов, 2016. 73 с.
7. Мурзин А.Д. Экологический парк как инструмент обеспечения устойчивости городского пространства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3, № 4. С. 60–66.
8. Привалова Н.М., Двадненко М.В., Шрамко Н.В. Экологическая ситуация в городе Краснодаре // Международный журнал экспериментального образования: Журнал. Пенза: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2016. № 91. С. 71.
9. Бауэр Н. В. Инновационные подходы в культуре формирования ландшафтов городской среды // Теория и практика общественного развития. 2015. № 11. С. 221–223.
10. Мальчикова А.Г. Ландшафтно-экологический аспект городского паркового строительства // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №5/2022. с. 460–469.
11. Базилевич А.М. Классификация и типология объектов ландшафтной архитектуры // Творчество и современность. 2017. № 3 (4). С. 5–11.
12. Максименко А.Е., Малаховская А.И. Современные тенденции развития садово-паркового искусства // Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада. 2018. Т. 147. С. 179–181.
13. Ачковский И.А., Золотарева М.В. Инновационные методы оснащения современных парковых пространств. //Сборник научных трудов студентов магистратуры кафедры дизайна архитектурной среды: Сборник статей. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. С. 13–17.
14. Субботин О.С. Ландшафтный урбанизм и организация пространственной среды: эволюция и новые реальности//Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 1(58). С. 116–125. DOI 10.17673/Vestnik.2025.01.16.
15. Бауэр Н.В. Инновационные подходы в культуре формирования ландшафтов городской среды // Теория и практика общественного развития. 2015. № 11. С. 221–223
16. Иванихина А.А. Янакова Л.Г., Золотарева М.В. Иммерсивные технологий как метод интеграции цифрового контента в парковое пространство // Системные технологии. 2023. № 3(48). С. 214–218. DOI 10.55287/22275398_2023_3_214. – EDN EHESRZ.
17. Ястребова Н.А. Принципы градостроительного освоения уникальных природных комплексов. Волгоград: ВолгГТУ, 2019. 137 с.
18. Тарасова Н.П., Беднова О.В., Кузнецов В. А. Система городских охраняемых природных территорий и устойчивое развитие мегаполиса // Экология урбанизированных территорий. 2011. № 3. С. 12–17.
19. Лекарева Н.А. Градостроительное регулирование ценных природных территорий в городе // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 28–32.
20. Федотов Е.С. Социальная роль благоустройства городской среды мегаполиса // Социальная политика и социология. 2013. № 2-1. С. 272–284.
21. Волынская А.А., Гриднев Д.З., Функционирование природных территорий в городе и режимы их использования // Наука и современность. 2010. № 5-1. С. 49–53.

Информация об авторах

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

Ачковский Илья Александрович, магистрант кафедры дизайн архитектурной среды. E-mail: ardi.achkovsky@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул. 4.

Поступила 11.07.2025 г.

© Золотарева М.В., Ачковский И.А., 2026

*Zolotareva M.V., Achkovskij I.A.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

*E-mail: goldmile@yandex.ru

THE CONCEPT OF COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF PARK TERRITORY ON THE EXAMPLE OF CHISTYAKOVSKAYA GROVE IN KRASNODAR

Abstract. The article considers the concept of integrated development of park territories. The purpose of this study is to develop a concept of integrated development of Chistyakovskaya Grove and the VDNKh complex located on its territory in Krasnodar. The central location of the park is an advantage, since it can become not only a place of rest, but also a cultural center of the city. The objectives of the study were defined as: analysis of the current state and problems of the Chistyakovskaya Grove park in conjunction with the VDNKh complex; development of conceptual approaches to the development of environmental, cultural and social potential of the territory; proposal of measures to improve the functional content of the territory and social inclusiveness. The result of the work were the main provisions of the concept, which determined the ways of introducing modern approaches based on the principles of sustainable development and environmental technologies. The proposed concept for the transformation of the Chistyakovskaya Grove territory is aimed at creating a unique public space that combines historical heritage and natural landscape. In this context, the zoning of the territory is decided, including the creation of thematic zones, such as an agro-industrial exhibition, ecology, culture and tourism, with an emphasis on environmental sustainability and modern requirements for public spaces.

Keywords: Krasnodar, Chistyakovskaya Grove, public areas, integrated development, natural environment, urbanized environment.

REFERENCES

1. Baryshnikova O.N., Kozyreva Yu. V. Fundamentals of landscape planning [Osnovy landshaftnogo planirovaniya] Barnaul Izd-vo Altajskogo gos. un-ta, 2017. 216 p. (rus)
2. Zhonuzakov A.E.H., Mirazimova G.U. Mirazimova G.U. City parks and some issues of landscape and environmental aspects [Gorodskie parki i nekotorye voprosy landshaftno-ekologicheskogo aspekta] Academy. 2020. No. 11 (62). Pp. 78–81. (rus)
3. Subbotin O.S. Formation of the Historical and Architectural Environment of Ekaterinodar [Formirovanie istoriko-arkhitekturnoj sredy g. Ekaterinodara] Arkhitektura: Sbornik nauchnykh trudov. Minsk: Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet, 2024. Pp. 105–112. (rus)
4. Chastikovskaya roshcha. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Chistyakovskaya_roshcha (date of request 03.05.2025).
5. Khotko Samir Khamidovich. The Discovery of Circassia: Cartographic Sources from the 14th to the 19th Centuries [Otkrytie Cherkessii: kartograficheskie istochniki XIV—XIX] Majkop: OAO «Poligraf-YUG», 2015. 292 p. (rus)
6. The theory of landscape architecture and design methodology: a short course of lectures [Teoriya landshaftnoj arkhitektury i metodologiya proektirovaniya: kratkij kurs lekcij]. sost. O.V. Azarova FGBOU VO «Saratovskij GAU». Saratov, 2016. 73 p. (rus)
7. Murzin A.D. Ecological park as a tool for ensuring the sustainability of urban space [Ekologicheskij park kak instrument obespecheniya ustojchivosti gorodskogo prostranstva] Economics and ecology of territorial entities]. Ehkonomika i ehkologiya territorial'nykh obrazovanij. 2019. T. 3, No. 4. Pp. 60–66. (rus)
8. Privalova N.M., Dvadenko M.V.1, Shramko N.V. The ecological situation in the city of Krasnodar [Ekologicheskaya situaciya v gorode Krasnodare] Mezhdunarodnyj zhurnal ehksperimental'nogo obrazovaniya: Zhurnal. Penza: Izdatel'skij Dom «Akademiya EstestvoznaniYA». 2016. No. 9-1. Pp. 71–82. (rus)
9. Bauehr N.V. Innovative approaches in the culture of urban landscape formation [Innovacionnye podkhody v kul'ture formirovaniya landshaftov gorodskoj sredy] Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. 2015. No. 11. Pp. 221–223. (rus)
10. Mal'chikova A.G. Landscape and Environmental Aspects of Urban Park Construction [Landshaftno-ekologicheskij aspekt gorodskogo parkovogo stroitel'stva]. Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal dlya studentov i prepodavatelej «StudNet» No. 5/2022. Pp. 460–469. (rus)
11. Bazilevich A.M. Classification and Typology of Landscape Architecture Objects. [Klassifikaciya i tipologiya ob'ektov landshaftnoj arkhitektury] Tvorchestvo i sovremennost'. 2017. No 3 (4). Pp. 5–11. (rus)
12. Maksimenko A.E., Malakhovskaya A.I. Modern trends in the development of gardening art. Collection of scientific works of the State Nikitsky

Botanical Garden [Modern trends in the development of landscape gardening] 2018. Vol. 147. Pp. 179–181. (rus)

13. Achkovskij I.A., Zolotareva M.V Innovative methods of equipping modern park spaces. [Innovacionnye metody osnashcheniya sovremennykh parkovykh prostranstv] Sbornik nauchnykh trudov studentov magistratury kafedry dizajna arkhitekturnoj sredy]: Sbornik statej. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2023. Pp. 13–17. (rus)

14. Subbotin O.S. Landscape Urbanism and Spatial Environment Organization: Evolution and New Realities [Landshaftnyj urbanizm i organizaciya prostranstvennoj sredy: ehvolyuciya i novye real'nosti] Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2025. Vol. 15. No. 1(58). Pp. 116–125. (rus)

15. Bauehr N.V. Innovative approaches in the culture of urban landscape formation [Innovacionnye podkhody v kul'ture formirovaniya landshaftov gorodskoj sredy] Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya. 2015. No. 11. Pp. 221–223. (rus)

16. Ivanikhina A.A. Yanakova L. G., Zolotareva M.V. Innovative approaches in the culture of urban landscape formation [Immersivnye tekhnologii kak metod integracii cifrovogo kontenta

v parkovoe prostranstvo]. Sistemye tekhnologii. 2023. No. 3(48). Pp. 214–218. (rus)

17. Yastrebova N.A. Principles of urban development of unique natural complexes [Principy gradostroitel'nogo osvoeniya unikal'nykh prirodnykh kompleksov]. Volgograd: VolGGTU, 2019. 137 p. (rus)

18. Tarasova N.P., Bednova O.V., Kuznecov V.A. The system of urban protected natural areas and sustainable development of the metropolis [Sistema gorodskikh okhranyaemykh prirodnykh territorij i ustojchivoe razvitie megapolisa] Ehkologiya urbanizirovannykh territorij. 2011. No. 3. Pp. 12–17.

19. Lekareva N.A. Urban planning regulation of valuable natural areas in the city [Gradostroitel'noe regulirovanie cennykh prirodnykh territorij v gorode] Vestnik MGSU. 2010. No. 1. Pp. 28–32.

20. Fedotov E.S. The social role of improving the urban environment of a megalopolis [Social'naya rol' blagoustrojstva gorodskoj sredy megapolisa] Social'naya politika i sociologiya. 2013. No. 2–1. Pp. 272–284.

21. Volynskaya A.A., Gridnev D.Z., Functioning of natural areas in the city and their use regulations [Funkcionirovanie prirodnykh territorij v gorode i rezhimy ikh ispol'zovaniya] Nauka i sovremennost'. 2010. No. 5–1. Pp. 49–53.

Information about the authors

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

Achkovskij, Il'ya. A. Master's student at the Department of Architectural Environment Design. E-mail: ardi.achkovsky@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya St. 4.

Received 11.07.2025

Для цитирования:

Золотарева М.В., Ачковский И.А. Концепция комплексного развития парковой территории на примере Чистяковской роши в Краснодаре // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 52–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-52-60

For citation:

Zolotareva M.V., Achkovskij I.A. The concept of comprehensive development of park territory on the example of Chistyakovskaya grove in Krasnodar. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 52–60. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-52-60

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-61-72

Тажур М.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4
E-mail: tajourmajd@gmail.com

ОТКРЫТЫЕ ОБЩЕСТВЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВА В ПОСТКОНФЛИКТНЫХ СИРИЙСКИХ ГОРОДАХ: СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ

Аннотация. В настоящем исследовании предпринята попытка переосмысления подходов к развитию городских центров Сирии. В отличие от территорий, подвергшихся масштабным разрушениям, такие города, как Дамаск, Латакия, Тартус и подобные им, требуют разработки альтернативных стратегий, ориентированных не на реконструкцию, а на устойчивое развитие. В этой связи на градостроителей возлагается задача по формированию инновационных подходов к городскому проектированию. В статье утверждается необходимость разработки специальных стратегий восстановления исторических центров городов Сирии в постконфликтный период. На основе анализа мирового опыта автором предлагается социально-пространственный подход к организации сети открытых общественных пространств. Данный стратегический подход рассматривается как наиболее перспективный, позволяющий решать задачи преодоления этнических, конфессиональных, религиозных и политических разногласий в городском социуме. Обосновывается целесообразность интеграции морфологических, социологических и феноменологических аспектов городской среды в процесс проектирования сетевой системы открытых общественных пространств. Данный подход рассматривается как вклад в реализацию стратегии формирования толерантной городской среды.

Ключевые слова: Сирия, постконфликтный период, стратегический подход, социально-пространственный подход, сетевая система, открытые общественные пространства, толерантная городская среда.

Введение. О необходимости нового стратегического подхода к городам послевоенной Сирии.

Градостроительное развитие в Сирии после войны 2011–2024 гг. представляет собой многогранную проблему. Арабская Республика Сирия пережила длительный период региональных, международных и локальных конфликтов, начиная с 2011 года по 8 декабря 2024 года, когда было объявлено о падении политического режима в Дамаске.

В условиях современных исторических обстоятельств появилась уникальная возможность восстанавливать города, основываясь на новых подходах и стратегиях, которые направлены на укрепление единства Сирии и предотвращение религиозной фрагментации. Известно, что войны начинаются с вооружённых столкновений, однако они неизбежно перерастают в глубокие экономические кризисы. Та же опасность заключается в том, что такие конфликты часто трансформируются в социальные и гражданские войны, где стороны конфликтуют по религиозно-конфессиональной принадлежности.

Особенность Сирии состоит в её уникальном многообразии монотеистических религий, таких как ислам, христианство и иудаизм (рис. 1). Среди населения преобладают арабы-сунниты (60 %), алавиты (12 %), курды (9 %), орто-

доксальные христиане (9%), армянские христиане (4 %), друзы (3 %) и другие группы (2 %) [1]. Это разнообразие должно лечь в основу нового градостроительного подхода, который способствует единству Сирийского государства, не розни по религиозному и этническому признаку.

Известная в арабском мире книга «Конфликты цивилизаций» (1996) выступает за создание пространств сектантского характера [2]. Такая философия способствует усилению разобщённости общества. Однако, современные градостроительные подходы, наиболее распространённые на Ближнем Востоке, придерживаются противоположной концепции.

В странах, переживших подобные кризисы, разработка пространственных стратегий развития начинается с установления диалога между культурами, обеспечения разнообразия и гармонии между всеми слоями общества. В этом контексте особая роль отводится принимаемым градостроителями стратегиям развития территории Сирии. Одним из ключевых международных документов в этой сфере является Конвенция Фару (2005) [3]. Она подчеркивает важность совместного проживания, улучшения качества жизни и местной среды для населения.

Эти идеи тесно связаны с градостроительной концепцией формирования «открытых общественных пространств» в городской среде, кото-

рые представляют собой пространственно и социально интегрированные общедоступные зоны рекреации, общения и другой повседневной деятельности жителей, к тому же безопасной от транспорта. Такой подход воплощает принципы гражданственности, социальной сплоченности, соучастования и местной демократии.

Через реализацию данной стратегической концепции становится возможным строительство новой Сирии, где будет иметь место диалог между людьми и группами с различным этническим, культурным, религиозным и языковым происхождением. Это позволит достичь социальной интеграции и плюрализма, при котором представители разных культур смогут мирно сосуществовать в едином пространстве.

В рамках научного дискурса анализ актуальных исследований, посвященных сирийским урбанизированным центрам за последние пять лет, выявил преобладание работ, ориентированных на процессы регенерации городской среды после деструктивных воздействий, что подтверждается исследованиями Щербины Е.В., Белала А.А., Салмо А. [4, 5], Баннуда Г. [6, 7].

В многочисленных научных исследованиях Бибри С [9], Джабарин Й [10], Кропф К [11]. было установлено, что проектирование открытых общественных пространств является эффективным инструментом для ревитализации городских центров и обеспечения их устойчивого и инклюзивного развития. Важность данного подхода также подчеркивается международными организациями, в частности Программой ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат) [12, 14, 15], UCLG [16], GSSO [17], которая акцентирует внимание на необходимости интеграции общественных пространств в стратегии развития городских центров.

При этом, практическая реализация ограничилась рядом семинаров, организованных Высшим институтом регионального планирования в Дамаске в период 2021–2022 гг., а также разра-

боткой Стратегии развития исторического центра Дамаска до 2040 года, нацеленной на трансформацию центральной части города в интегрированные, динамичные и устойчивые районы. В частности, один из семинаров акцентировал внимание на потенциале концепции 15-минутного города [8].

Вышеупомянутые инициативы подчеркивают необходимость разработки стратегического подхода к проектированию городской среды в историческом центре Дамаска, с возможностью его экстраполяции на другие сирийские города. В связи с этим, было проведено исследование и анализ международного опыта в области ревитализации городских центров, не подвергшихся значительным инфраструктурным разрушениям. Примером успешной практики является деятельность компании Gehl Architects [18–21], зарекомендовавшей себя в качестве лидера в сфере восстановления исторических городских центров по всему миру.

Предмет исследования: стратегическое проектирование сетевой системы открытых общественных пространств.

Объект исследования: сеть открытых общественных пространств.

Цель исследования: разработка стратегического подхода к восстановлению, направленного на формирование толерантных и устойчивых городских центров.

Методология исследования: в рамках настоящего исследования была применена аналитическая индуктивная методология, основанная на изучении международного опыта, а также на подходах и принципах, используемых в глобальной практике проектирования открытых общественных пространств. Полученные данные были интегрированы посредством дедуктивного метода, что позволило сформулировать стратегический подход к проектированию, адаптированный к контексту постконфликтных сирийских городских центров.

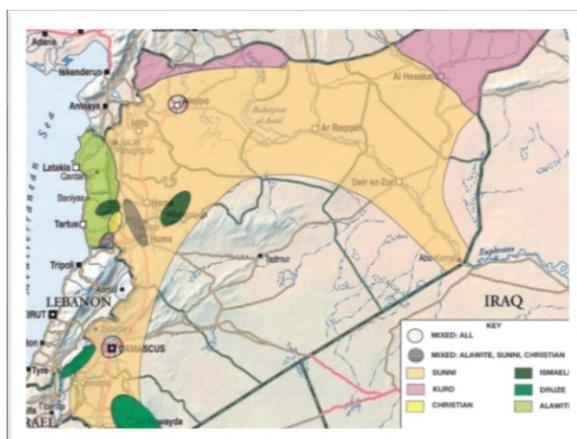


Рис. 1. Демографическая структура населения Сирийской Арабской Республики [1]

Основная часть. Теоретические и практические основы проектирования устойчивых открытых общественных пространств.

Механизмы устойчивого развития городских территорий. Понятие «устойчивость» отражает долгосрочный стратегический подход, в частности, применительно к развитию городских агломераций. Следует отметить, что устойчивое городское развитие охватывает не только экологические аспекты, но также предполагает достижение социальной справедливости и равноправия. Несмотря на существование различных интерпретаций концепции устойчивого города, в научной среде наблюдается консенсус относительно того, что данный подход интегрирует экономические, экологические, социальные и культурные цели [9]. Архитектор Джабарин (Jabareen), в свою очередь, выделил ключевые принципы обеспечения социальной устойчивости городов, включающие безопасность, равенство, и что важно для градостроительства, *экологическое проектирование и устойчивые городские формы* [10]. Хотя универсальное определение устойчивой городской формы затруднено ввиду её зависимости от специфики локальных сообществ, в мировой практике сформировался ряд концепций, таких как «компактный город», «эко-город», «зелёный город», «городские ландшафты», «новый урбанизм» и др. [9]. Тем не менее, научное сообщество сходится во мнении, что компактные устойчивые городские формы служат фундаментом для обеспечения устойчивости городской среды благодаря таким характеристикам, как компактность, устойчивая транспортная система, высокая плотность застройки, смешанное землепользование, озеленение и проектирование открытых общественных пространств [10]. Таким образом, устойчивые открытые общественные пространства представляют собой интеграцию *материально-пространственной структуры* (urban built в зарубежной терминологии; отражает морфологическую структуру), *социально-пространственной структуры* (urban form; отражает социально-пространственное распределение населения: поведенческие паттерны и виды деятельности), и *пространственно-временных отношений* (отражает восприятие феноменологических аспектов общественного пространства) [11].

Политика открытых общественных пространств. ООН акцентировала внимание на том, что стратегии урбанистического развития в XXI веке должны быть ориентированы на гуманизацию городской среды, выделяя ключевую роль открытых общественных пространств в рамках политики и подходов к градостроительству [12].

В арабском мире, несмотря на признание значимости общественных пространств и их влияния на качество городской жизни, регион продолжает находиться на этапе разработки программ и стратегий, направленных на реализацию данного аспекта. Согласно данным ООН-Хабитат, доля общественных пространств в структуре городских территорий арабских стран составляет лишь 2%, в то время как в Европе этот показатель достигает 12%. Как отмечает Арабский институт городского развития, подобная ситуация обусловлена рядом факторов, среди которых наиболее существенными являются последствия политической и экономической нестабильности, вызванные гражданскими конфликтами (например, в Ливане и Сирии), а также экономические кризисы, затронувшие такие страны, как Египет, Иордания и Тунис. В то же время государства Персидского залива, характеризующиеся относительной политической и экономической стабильностью, сосредоточены на реализации крупномасштабных инфраструктурных проектов, отодвигая на второй план развитие открытых общественных пространств [13].

Рассматривая открытые общественные пространства в контексте мировой градостроительной политики, следует отметить, что в целях устойчивого развития на период до 2030 года ООН выделяет Цель № 11, акцентирующую внимание на обеспечении устойчивого развития городов [14]. Данная цель предполагает «создание инклюзивных, безопасных, адаптивных и устойчивых городских поселений». В частности, пункт 11.7 подчеркивает «необходимость обеспечения равного доступа к экологически благоприятным и безопасным общественным пространствам для всех групп населения, включая детей, женщин и лиц пожилого возраста». Параллельно с этим, Хартия *открытых общественных пространств* рассматривает такие пространства как единую интегрированную и взаимосвязанную систему, что требует от органов местного самоуправления разработки стратегических подходов к формированию сети открытых общественных зон [15]. Политика создания сети общественных открытых пространств ориентирована на достижение устойчивого пространственного развития посредством реализации ряда мер, включающих: – улучшение инфраструктуры в неблагополучных районах через развитие общественных пространств; – интеграцию планирования общественных пространств в систему городского развития; – признание общественных пространств в качестве стратегического приоритета в процессе урбанизации; – реализацию права на городскую политику; – вовлечение местных сообществ в процессы принятия решений. Таким образом,

указанные меры способствуют формированию устойчивой и инклюзивной городской среды [16].

Принципы организации и проектирования открытых общественных пространств: в рамках норвежского Руководства по организации общественных открытых пространств для стран Балтийского региона был разработан комплекс универсальных принципов, лежащих в основе стратегии формирования таких территорий. К числу ключевых принципов относятся:

- максимальное использование природного потенциала и уникальных ландшафтных особенностей локации;
- формирование концепции, учитывающей локальную идентичность сообщества;
- интеграция значимых региональных структур;
- установление взаимосвязей между локальными элементами инфраструктуры;
- создание компактной городской среды, доступной в пределах 10-минутной пешеходной доступности;
- обеспечение высокого качества и эстетической привлекательности физической среды;
- активное вовлечение местного сообщества в процесс удовлетворения потребностей и запросов жителей;
- организация временных общественных пространств, адаптированных под текущие нужды [17].

Кроме того, в Руководстве выделены пять основополагающих принципов проектирования *открытых общественных пространств*:

- функциональность: обеспечение возможности использования территории для различных целей в различные временные периоды (сезоны, время суток);
- доступность: создание условий для пешеходной доступности ключевых общественных зон для всех категорий населения;
- связанность: формирование сети пешеходных и велосипедных маршрутов, объединяющих различные общественные пространства;
- качество: разработка дизайна, ориентированного на удовлетворение потребностей пользователей;
- природная интеграция: включение элементов городской природы, таких как зеленые зоны, водные объекты и городское сельское хозяйство, способствующих активизации общественной жизни на открытом воздухе. Эти принципы направлены на создание комфортной, функциональной и устойчивой среды, способствующей развитию социальной активности и улучшению качества жизни населения.

Мировой опыт в разработке пространственных стратегий и открытых общественных пространств на основе социологического и морфологического подходов.

Архитектурное бюро Gehl Architects разработало комплексные стратегии развития городских центров по всему миру, основанные на социологическом и морфологическом подходах, с целью создания, ориентированной на человека и комфортной для жизни городской среды. К числу этих стратегий относятся (рис. 2):

1. Стратегия для центра города Ванкувер (Канада) включает следующие направления [18]:
 - создание разнообразных и активных общественных пространств, обеспечивающих жизнедеятельность центра города в любое время суток и в любой день недели;
 - расширение участия общественности в процессе формирования общественных пространств;
 - укрепление взаимосвязи между центром города и прибрежной зоной;
 - интеграция сети общественного транспорта с пешеходными маршрутами для формирования единой системы открытых общественных пространств.
2. Стратегия для центра города Стамбул (Турция) включает следующие направления [19]:
 - создание пешеходно-ориентированного города посредством сокращения использования личного транспорта и развития сети пешеходных и велосипедных дорожек;
 - развитие города как центра развлечений с множеством общественных пространств, включая зеленые зоны и скверы;
 - формирование привлекательного города, предлагающего разнообразные виды досуга для всех возрастных групп населения.
3. Стратегия для центра города Вашингтон (США) включает следующие направления [20]:
 - создание устойчивого городского центра на основе сети зеленых общественных пространств;
 - формирование привлекательного центра за счет разнообразия общественных пространств;
 - обеспечение понятной и легкой доступности центра города посредством развития сети общественного транспорта;
 - поддержание оживленной атмосферы в центре города в любое время года.
4. Стратегия для центра города Сидней (Австралия) включает следующие направления [21]:
 - использование преимуществ природного ландшафта (зеленых зон и водных объектов) и их интеграция в систему открытых общественных пространств;

- развитие поведенческой сети пешеходных, велосипедных и транспортных маршрутов;
- создание разнообразных мест для встреч жителей на различных уровнях (от микрорайона

- до города) с целью стимулирования позитивного социального взаимодействия;
- развитие сети крупных городских площадей.

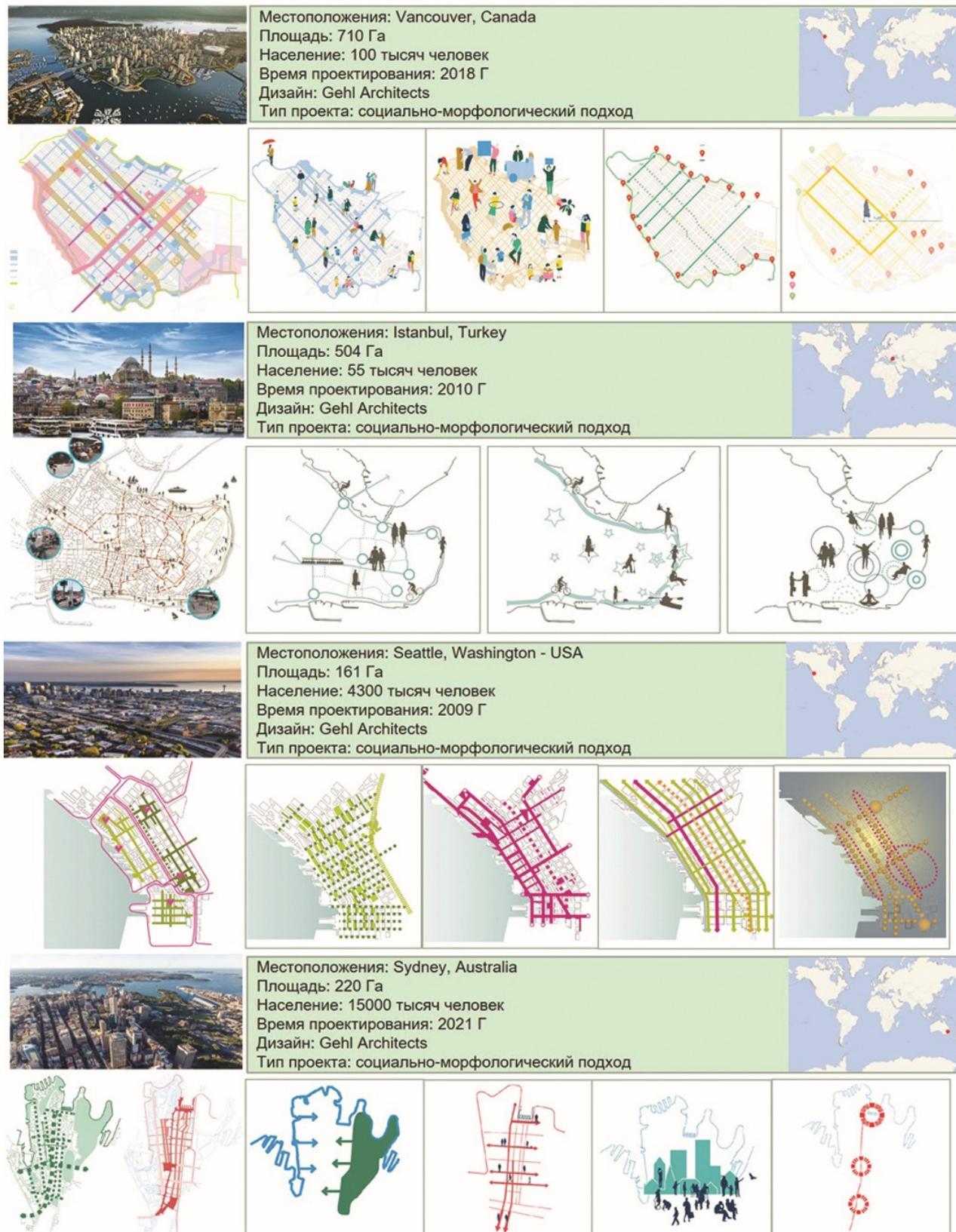


Рис. 2. Мировой опыт в разработке пространственных стратегий и открытых общественных пространств на основе социологического и морфологического подходов

Мировой опыт в разработке пространственных стратегий и открытых общественных пространств на основе феноменологического и морфологического подходов.

Стратегии пространственного развития, основанные на феноменологическом и морфологическом подходах, зачастую разрабатываются при поддержке официальных организаций, таких как ЮНЕСКО и ООН-Хабитат, или национальных культурных институтов и министерств, с целью сохранения городской идентичности и развития туризма. Примерами таких стратегий являются (рис. 3):

1. Стратегия сохранения панорамы центра города Санкт-Петербург (Россия) включает [22]:

- защиту исторического поселения, в котором расположены объекты всемирного наследия, в радиусе до 10 км от центра города;

- развитие сети открытых общественных пространств, в которой 33 % площади приходится на улицы и водные объекты, а 15 % – на зеленые насаждения;

- формирование сети ментальных карт на основе объектов культурного наследия и исторических зданий, доминирующих в городском ландшафте и формирующих региональную и культурную идентичность города.

2. Стратегия интеграции культурного и природного наследия в городское развитие Лиона (Франция) включает [23]:

- охрану архитектурного наследия и территорий, имеющих важное историко-культурное значение, а также развитие территорий, прилегающих к археологическим объектам;

- подчеркивание роли природных (зеленых и водных) пространств как основы региональной идентичности Лиона;

- сочетание элементов наследия и природной идентичности для достижения и поддержания уникальной региональной идентичности города.

3. Стратегия развития культурных и туристических маршрутов в историческом центре города Фес (Марокко), Фес является одним из важнейших городов арабского мира с богатым исламским культурным наследием, включает [24]:

- создание пешеходных маршрутов, интегрированных в историческую структуру города и проходящих вдоль древних стен и через традиционные ремесленные кварталы;

- развитие культурных экскурсионных маршрутов по андалузским паркам и еврейским синагогам, отражающим мульти-культурную самобытность коренного населения.

4. Стратегия сохранения туристической и религиозной идентичности маршрута Пантеон-Треви в Риме (Италия) включает [25]:

- создание маршрута, объединяющего элементы исторического, культурного и религиозного наследия, такие как звуковое восприятие воды в фонтанах, музыка, визуальное восприятие религиозных символов и архитектурных сооружений, запахи и вкусы местной кухни, что в совокупности формирует уникальную международную идентичность Рима.

Социально-пространственный синтез как стратегический подход к устойчивым открытым общественным пространствам:

Синтезированная морфологическая сеть состоит из множества общественных пространств (рис. 4): – общественная зеленая зона вокруг центра города, соединяющая существующий ландшафтный потенциал и соединяющая с ним сеть зеленых улиц, доходящих до центра города; – сеть зеленых общественных пространств, включающая разнообразные зоопарки, растения, детские, исторические и рекреационные сады; – сеть общественных водных пространств, которая включает в себя преобразование водных элементов, таких как море, река или озеро, в оживленную общественную набережную города; – сеть иерархических общественных площадей, начиная от мест встреч на местном уровне и заканчивая уникальными общественными площадями на уровне города; – разнообразная сеть уличных дорожек, таких как улицы развлечений, улицы повседневной жизни и бульвары; – сеть общественного транспорта включает в себя использование современного электротранспорта общественного транспорта и автобусных стоянок в часть площади общественного пространства, а также использование современных электрических средств общественного транспорта.

Синтезированная социологическая сеть состоит из множества общественных пространств (рис. 5): – сеть пешеходных дорожек, благодаря которой пешеходное движение является приоритетом в транспортной системе; – сеть велосипедных дорожек, чтобы велосипеды стали основным средством передвижения; – сеть активных пространств, доступ к которым возможен в разное время; Разнообразная сеть занятий для разных возрастов, которыми можно заниматься в общественных местах; – разнообразная сеть мест встреч на разных уровнях от района до города; – сеть для перенаправления поведения людей с первичного на вторичное пути; – участие сообщества в проектировании общественных пространств с учетом потребностей и желаний местных жителей.

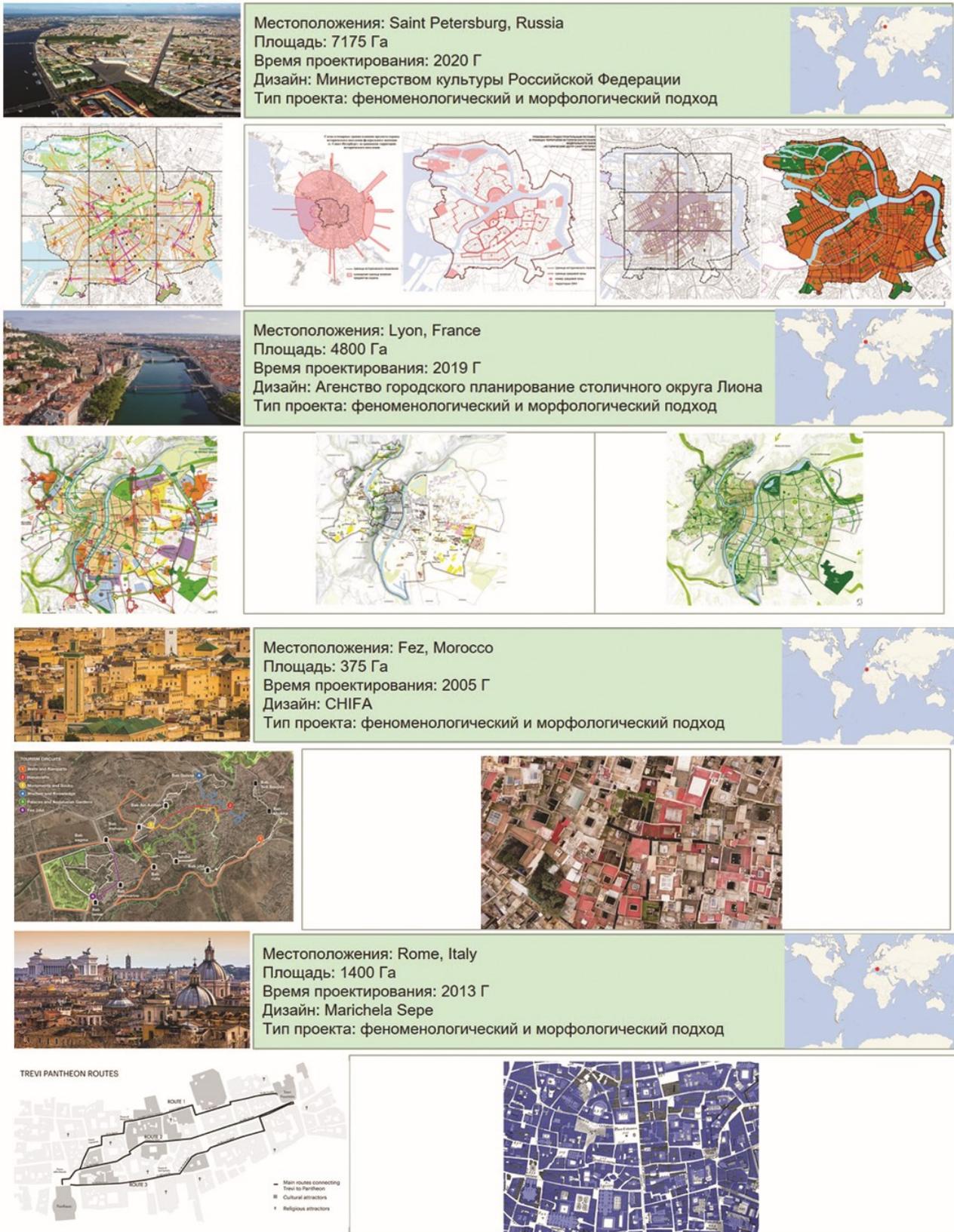


Рис. 3. Мировой опыт в разработке пространственных стратегий и открытых общественных пространств на основе феноменологического и морфологического подходов

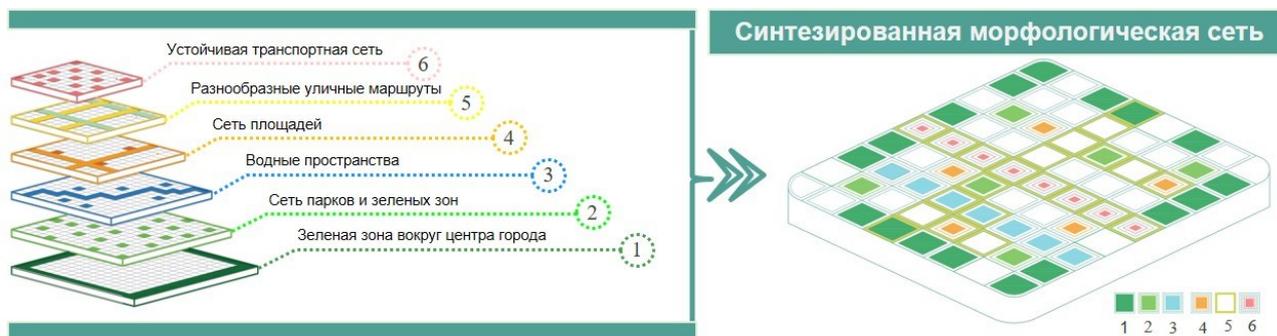


Рис. 4. Синтезированная морфологическая сеть

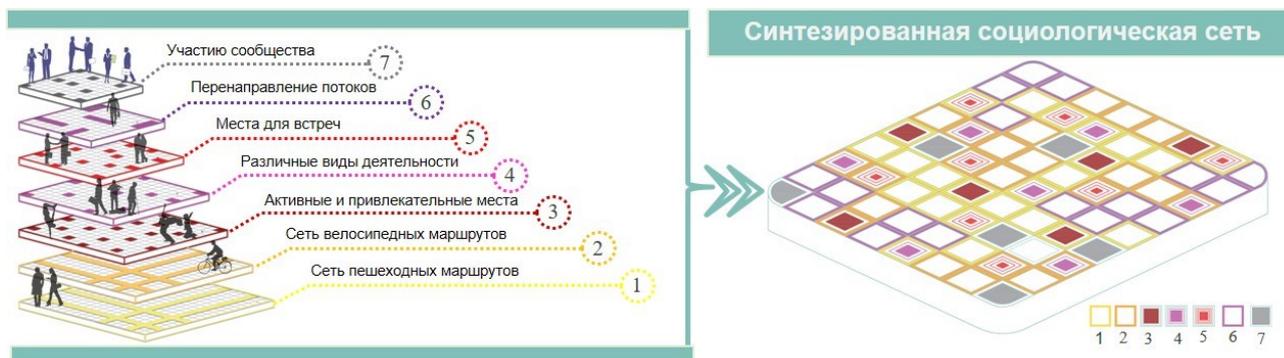


Рис. 5. Синтезированная социологическая сеть

Синтезированная феноменологическая сеть состоит из множества общественных пространств (рис. 6): – религиозные пути, соединяющие различные типы религий, существующих локально в данном месте; – культурные тропы связывают материальные и нематериальные объекты всемирного наследия, такие как важные здания и традиционные ремесла; – туристические тропы соединяют развлекательные зоны, ре-

стораны, кафе и рынки, привлекающие иностранных туристов; – сеть панорамных общественных пространств, способствующих визуальному, мысленному и сенсорному восприятию места и создающих уникальный феноменологический феномен; – сеть общественных пространств с региональной идентичностью, сохраняющая мысленный образ города для приезжих, туристов и горожан.

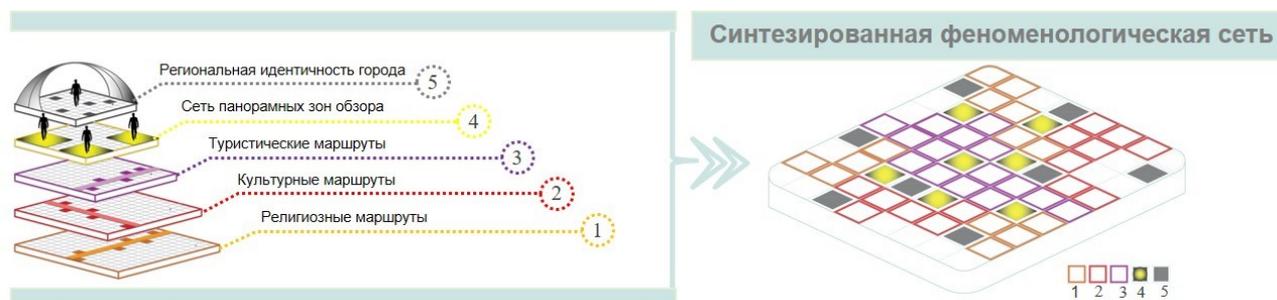


Рис. 6. Синтезированная феноменологическая сеть

Теоретическая модель для моделирования системы открытых общественных пространств как стратегического подхода к достижению социальной и пространственной устойчивости:

Интеграция гетерогенных физических пространств позволяет сформировать сеть открытых общественных пространств, трансформирующую утилитарные одно-функциональные зоны в гибкую, интегрированную и многофункциональную систему, где каждый элемент взаимодополняет друг друга.

Консолидация диверсифицированных социальных пространств способствует формированию сети открытых общественных пространств, обеспечивающей взаимосвязь между различными территориями и преодолевающей демографическую фрагментацию городской среды.

Сопряжение различных феноменологических пространств может инициировать создание сети открытых общественных пространств, направленной на усиление и сохранение чувства локальной идентичности и осознания места среди горожан.

Система открытых общественных пространств представляет собой комплекс разнообразных элементов, включающих зеленые зоны, водные объекты, улично-дорожную сеть, пешеходные и велосипедные маршруты, а также скверы и площади, объединенные в единую социально-пространственную структуру (рис. 7). Основной целью данной системы является обеспечение социальной устойчивости городской среды, которая предполагает активное социальное взаимодействие, инклюзивность вне зависимости от расовой, этнической или религиозной принадлежности, доступность для всех возрастных групп, а также создание безопасных условий

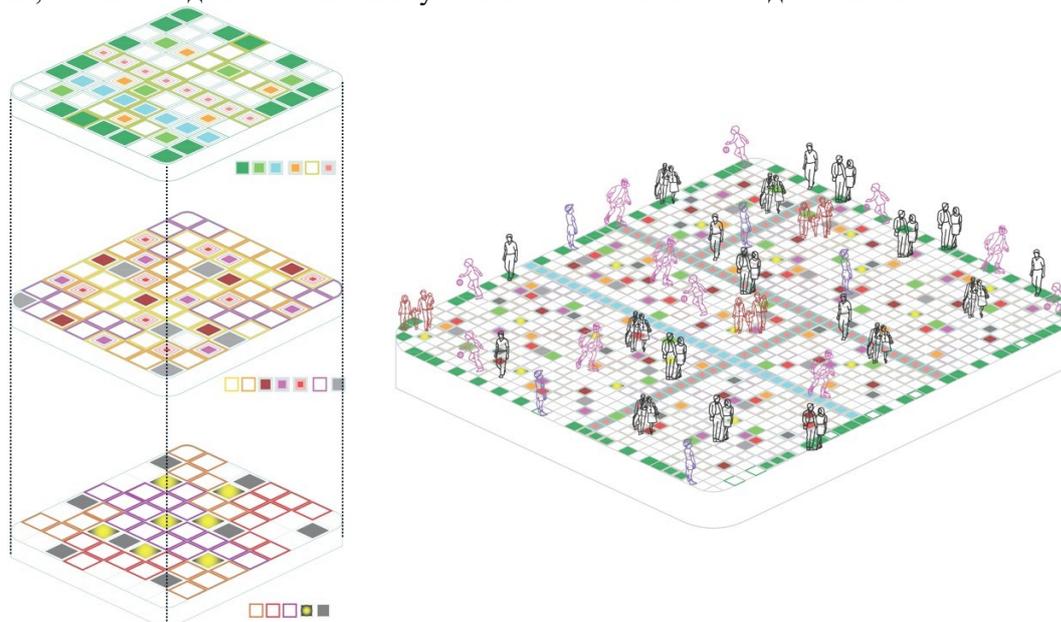


Рис. 7. Моделирование систем открытого общественного пространства

Выводы. Ключевая задача, стоящая перед градостроителями Сирии в современных условиях, заключается не столько в физическом восстановлении городской инфраструктуры, сколько в реализации гуманистического подхода к реконструкции городов. Достижение данной цели возможно исключительно через применение интегрированной стратегии, объединяющей социальные и пространственные аспекты. Такой подход предполагает создание сети открытых общественных пространств, способствующих интеграции граждан на основе принципов гражданства и гуманизма, что должно превалировать над любыми проявлениями сектантской идентичности. Предлагаемый подход к градостроительному проектированию потенциально способен:

- Оптимизировать интеграцию обособленных жилых кварталов в структуру города, формируя устойчивую и компактную городскую среду за счет дифференциации типов улично-дорожной сети;

для женщин, детей и представителей этнических меньшинств. Важным аспектом является вовлечение граждан в процессы градостроительства и проектирования общественных пространств. Кроме того, система направлена на достижение пространственной устойчивости, включающей экологические и экономические аспекты, а также многофункциональное использование территорий. В совокупности эти элементы способствуют формированию сети устойчивых открытых общественных пространств, которые обеспечивают равенство, баланс интересов, социальную справедливость и, что наиболее важно, сохранение человеческого достоинства.

- Повысить уровень комфорта городской среды путем интеграции зеленых насаждений и водных объектов с общественными пространствами;

- Сформировать устойчивые социально-ориентированные общественные пространства посредством привлечения местных жителей к процессу разработки концепций дизайна;

- Укрепить социальную сплоченность среди населения путем создания пространств для многоуровневых общественных взаимодействий;

- Создать привлекательные общественные пространства за счет интеграции пешеходной, велосипедной и общественной транспортной инфраструктуры;

- Сохранить уникальную идентичность территории, направляя потоки посетителей к объектам, отражающим ценности местного культурного наследия;

– Сформировать выразительную визуальную идентичность региона посредством проектирования открытых панорамных видов;

Способствовать формированию "пути памяти" города посредством интеграции исторических, религиозных и культурных маршрутов, создавая запоминающийся образ для посетителей.

Предлагаемый стратегический подход потенциально способствует преодолению сегрегации, характерной для районов с религиозно-гомогенной демографической структурой. Градостроительное проектирование, в особенности в контексте общественных пространств, рассматривается как ключевой инструмент ревитализации городов, переживших конфликты и гражданские войны. Обеспечение доступа и интеграция разнообразных социальных групп в уличную сеть, парковые зоны, площади, пешеходные маршруты и систему общественного транспорта является определяющим фактором устойчивости и социальной толерантности в городской среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Holliday J. Middle east security report – the struggle for Syria in 2011: an operational and regional analysis. The United States of America: The institute for the study of War, 2011, 28 p.
- Huntington S. The clash of civilizations and the remaking of world order. U.S.A. Copyright: Simon & Schuster, 1996, 410 p.
- Council of Europe. Draft Faro Declaration on the Council of Europe's Strategy for Developing Intercultural Dialogue. Ministerial Conference Intercultural Dialogue: The Way Ahead Closing Conference of the 50th Anniversary of the European Cultural Convention. Faro, Portugal. 2005. Pp. 1–6.
- А.А., Салмо А. Градостроительное восстановление исторических центров сирийских городов, разрушенных войной // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 5. С. 632–640. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.632-640
- Belal A., Shcherbina E. Post-war Planning for Urban Cultural Heritage Recovery //E3S Web of Conferences. 263. 05054. 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305054
- Баннуд Г. Методы реконструкции жилой застройки районов исторического центра г. Алеппо // Известия Вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. №2. С. 294–302.
- Баннуд Г. Архитектурно-композиционные особенности формирования исторической среды г. Алеппо (VI в. до н. э. – XXI в.). Санкт-петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2022. 216 p.
- Кахи Л. Дамаск 2040: Город 15-минутных кварталов – инновационный подход (на араб. яз.). Высший институт регионального планирования Дамасского университета. 2021.
- Bibri S. Compact urbanism and the synergic potential of its integration with data-driven smart urbanism: An extensive interdisciplinary literature review // Elsevier: Land Use Policy. 2020. Pp. 1–20.
- Jabareen Y. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts // Journal of Planning Education and Research. 2006. pp. 38-52.
- Kropf K. The handbook of urban morphology. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2017, 248 p.
- UN-Habitat. Note Presented by the Director-General of UNESCO - Humanizing the City: UNESCO's Vision. Habitat II City Summit. Istanbul. 3-14 June. 1996. 135 p.
- Арабский институт городского развития. К ярким общественным местам (на араб. яз.). Эр-Рияд, Саудовская Аравия: Наш город, 2024, 45 p.
- United Nations. Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Pp. 1–23.
- UN-Habitat. Charter of Public Space. Biennial Spazio Pubblico. INU. 2015. pp. 1-6.
- UCLG. UCLG Public Space Policy Framework by and for Local Governments. 5th UCLG Congress, 12-15th October, Bogota, 2016, 42 p.
- The Norwegian Government Security and Service Organisation (GSSO). Network of Public Spaces – An Idea Handbook. The Ministry of Local Government and Modernisation. Oslo, 2019. 120p.
- Gehl Architects. Downtown Public Space Strategy – City of Vancouver. ISSUU. 2018.
- Gehl Architects & EMBARQ. Istanbul – An accessible city – a city for people. ISSUU. 2010.
- Gehl Architects. Downtown Seattle – Public Spaces & Public Life. ISSUU. 2009.
- Gehl Architects. Public Spaces & Public Life studies. City of Sydney. 2021.
- Министерства культуры Российской Федерации. Об утверждении предмета охраны, границ территории и требований к градостроительным регламентам в границах территории исторического поселения федерального значения город Санкт-Петербург. Официальное опубликование правовых актов. 2020.
- Agence d'Urbanisme de Lyon. Integrating cultural and natural heritage values in urban development processes in Lyon (France). UNESCO. 2019.
- Cultural Heritage Finance Alliance "CHiFA". Case Studies in Heritage Regeneration - Medina of Fez Morocco. ISSUU. 2005.

25. Sepe M. Rome: the Trevi Pantheon route – Planning and place in the city: Mapping place identity. London: Routledge Taylor & Francis Group, 2013. Pp. 113–138.

Информация об авторе:

Тажур Мажд, аспирант, кафедры «Градостроительство». E-mail: tajourmajd@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4.

Поступила 29.05.2025 г.

© Тажур М., 2026

Tajour M.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: tajourmajd@gmail.com

OPEN PUBLIC SPACES IN POST-CONFLICT SYRIAN CITIES: A STRATEGIC APPROACH TO RECOVERY

Abstract. *This study attempts to rethink approaches to the development of urban centers in Syria. Unlike territories that have suffered large-scale destruction, cities such as Damascus, Latakia, Tartus, and the like require the development of alternative strategies focused not on reconstruction, but on sustainable development. In this regard, urban planners face the task of developing innovative approaches to urban design. The article argues for the need to develop special strategies for the restoration of the historical centers of Syrian cities in the post-conflict period. Based on the analysis of international experience, the author proposes a socio-spatial approach to the organization of a network of open public spaces. This strategic approach is considered the most promising, allowing to solve the problems of overcoming ethnic, confessional, religious, and political differences in the urban society. The expediency of integrating morphological, sociological, and phenomenological aspects of the urban environment into the design process of a network system of open public spaces is substantiated. This approach is considered as a contribution to the implementation of the strategy for the formation of a tolerant urban environment.*

Keywords: *Syria, post-conflict period, strategic approach, socio-spatial approach, network system, open public spaces, tolerant urban environment.*

REFERENCES

- Holliday J. Middle east security report – the struggle for Syria in 2011: an operational and regional analysis. The United States of America: The institute for the study of War, 2011, 28 p.
- Huntington S. The clash of civilizations and the remaking of world order. U.S.A. Copyright: Simon & Schuster, 1996, 410 p.
- Council of Europe. Draft Faro Declaration on the Council of Europe's Strategy for Developing Intercultural Dialogue. Ministerial Conference Intercultural Dialogue: The Way Ahead Closing Conference of the 50th Anniversary of the European Cultural Convention. Faro, Portugal. 2005. Pp. 1–6.
- Shcherbina E.V., Belal A.A., Salmo A. Historic centres of Syrian towns ruined by the war: restoration through urban planning. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(5) Pp. 632–640. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.632-640 (rus)
- Belal A., Shcherbina E. Post-war Planning for Urban Cultural Heritage Recovery. E3S Web of Conferences. 2021. 263. 05054. DOI: 10.1051/e3sconf/202126305054
- Ghaleb B. Methods for the reconstruction of residential areas in the historical Centre of Aleppo. News of Universities. Investments. Construction. Real Estate. 2020. No. 2. Pp. 294–302.
- Bannoud G. Architectural and compositional features of the formation of the historical environment of the city of Aleppo (VI century BC - XXI century). St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2022. 216 p.
- Kakhi I. Damascus 2040: A city of 15-minute neighborhoods - an innovative approach. Damascus University Higher Institute of Regional Planning. 2021. (in Arabic)
- Bibri S. Compact urbanism and the synergic potential of its integration with data-driven smart urbanism: An extensive interdisciplinary literature review. Elsevier: Land Use Policy. 2020. Pp. 1–20.
- Jabareen Y. Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. Journal of Planning Education and Research. 2006. Pp. 38–52.

11. Kropf K. The handbook of urban morphology. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2017, 248 p.
12. UN-Habitat. Note Presented by the Director-General of UNESCO – Humanizing the City: UNESCO's Vision. Habitat II City Summit. Istanbul. 3-14 June. 1996. 135 p.
13. Arab Institute for Urban Development. Towards Vibrant Public Spaces. Riyadh, Saudi Arabia: Our City, 2024, 45 p. (in Arabic)
14. United Nations. Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. Pp. 1–23.
15. UN-Habitat. Charter of Public Space. Biennial Spazio Pubblico. INU. 2015. Pp. 1–6.
16. UCLG. UCLG Public Space Policy Framework by and for Local Governments. 5th UCLG Congress, 12-15th October, Bogota, 2016, 42 p.
17. The Norwegian Government Security and Service Organisation (GSSO). Network of Public Spaces – An Idea Handbook. The Ministry of Local Government and Modernisation. Oslo, 2019. 120 p.
18. Gehl Architects. Downtown Public Space Strategy – City of Vancouver. ISSUU. 2018.
19. Gehl Architects & EMBARQ. Istanbul – An accessible city – a city for people. ISSUU. 2010.
20. Gehl Architects. Downtown Seattle – Public Spaces & Public Life. ISSUU. 2009.
21. Gehl Architects. Public Spaces & Public Life studies. City of Sydney. 2021.
22. Ministry of Culture of the Russian Federation. On approval of the subject of protection, territorial boundaries and requirements for urban planning regulations within the boundaries of the territory of the historical settlement of federal significance, the city of St. Petersburg. Official publication of legal acts. 2020.
23. Agence d'Urbanisme de Lyon. Integrating cultural and natural heritage values in urban development processes in Lyon (France). UNESCO. 2019.
24. Cultural Heritage Finance Alliance "CHiFA". Case Studies in Heritage Regeneration – Medina of Fez Morocco. ISSUU. 2005.
25. Sepe M. Rome: the Trevi Pantheon route – Planning and place in the city: Mapping place identity. London: Routledge Taylor & Francis Group, 2013. Pp. 113–138.

Information about the author

Tajour Majd, Postgraduate student. E-mail: tajourmajd@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya St., Bldg.4.

Received 29.05.2025

Для цитирования:

Тажур М. Открытые общественные пространства в постконфликтных сирийских городах: стратегический подход к восстановлению // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 61–72
DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-61-72

For citation:

Tajour M. Open public spaces in post-conflict syrian cities: a strategic approach to recovery. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 61–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-61-72

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83

**Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.*

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

**E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru*

РАЗДЕЛЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПОПЕРЕЧНО-ПОТОЧНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ С ЖАЛЮЗИЙНОЙ РЕШЕТКОЙ

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования и показана возможность применения поперечно-поточного классификатора с жалюзийной решеткой для эффективного разделения сыпучих материалов по крупности частиц в диапазоне $0,1 \dots 1,0$ мм. Опыты проводились на кварцевых песках Таулинского и Сухринского карьеров. При проектировании жалюзийной решетки расчет ее элементов производился с помощью CFD моделирования. Для расчета камеры осаждения классификатора решалась система дифференциальных уравнений движения частиц методом прогноза и коррекции. Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать данные методы для создания промышленных аппаратов. Особенностью жалюзийного классификатора является организация каскадного принципа разделения за счет многократной пересортировки крупного продукта, который сыпается сверху вниз по жалюзийной решетке. В результате достигается высокая эффективность, что позволяет использовать данный классификатор в промышленности для разделения различных сыпучих материалов пневматическим способом. При этом расход воздуха на процесс пневмокласификации соизмерим с расходом воздуха на аспирацию грохота. Граница разделения может регулироваться в широких пределах за счет изменения расхода воздуха. Классификатор с жалюзийной решеткой имеет низкое аэродинамическое сопротивление, и как следствие низкие удельные затраты электроэнергии, потребляемые вентилятором.

Ключевые слова: сыпучие материалы, песок, гранулометрический состав, граница и эффективность разделения, кривая фракционного разделения.

Введение. В различных отраслях промышленности, таких как огнеупорная, керамическая, стекольная, литейная и др., широко используются различные дисперсные сыпучие материалы. Отраслевые стандарты предъявляют жесткие требования к гранулометрическому составу используемых дисперсных материалов. Например, для формовочных песков содержание тонких классов крупности $0 \dots 63$ мкм или $0 \dots 100$ мкм не должно превышать 0,5 %. Повышенное содержание тонких классов снижает газопроницаемость литейных форм. Стекольные пески не должны содержать пылевые фракции менее 100 мкм, так как они выносятся потоком газа и забивают регенератор печи [1–3]. Кроме этого, мелкие частицы часто имеют другой минералогический состав и повышенное содержание вредных примесей. Например, в литейных формовочных песках во фракциях менее 0,1 мм содержится глинистая составляющая [4, 5]. Чтобы удалить мелкие и крупные частицы обычно применяется рассев на грохотах. Однако сетки с размерами мелких ячеек подвержены быстрому износу и забивке материалом, а производительность существенно уменьшается с уменьшением размера ячеек. Кроме этого, чтобы исключить пыление грохот должен иметь эффективную систему аспирации. Пластины жалюзийной решетки классификатора

имеют достаточно большую толщину и изготавливаются из износостойкой стали, поэтому их срок службы на порядок превышает срок службы сеток грохота.

Цель работы. На основе экспериментальных данных и примеров промышленного использования показана возможность использования поперечно-поточного классификатора для задач разделения по мелким и крупным границам.

Основная часть. Поперечно-поточные классификаторы относятся к гравитационным пневматическим классификаторам. К настоящему времени разработано большое количество конструкций данных аппаратов и получен опыт промышленной эксплуатации [6–8].

На рисунке 1 представлены фотографии классификатора с жалюзийной решеткой, а на рисунке 2 показана схема экспериментальной установки. Производительность данного лабораторного пневмокласификатора составляет до 500 кг/ч.

Работа классификатора осуществляется следующим образом. Навеска исходного материала поступает на верхнюю часть жалюзийной решетки 10. Материал двигается вниз по решетке под действием силы тяжести и продувается поперечным потоком воздуха. Мелкие частицы выносятся потоком воздуха и осаждаются в камере 4 и циклоне 5. Обеспыленный крупный материал

поступает в поддон 3. Таким образом крупный продукт многократно продувается воздухом во время движения по жалюзийной решетке 10. Регулировка границы разделения осуществляется за счет изменения скорости поперечного воздушного потока. При этом отсутствует пылевыведение,

так как установка находится под разрежением. Концентрация материала определяется отношением расхода материала к расходу воздуха и может регулироваться в широких пределах. Рабочий диапазон расходной концентрации для данного типа аппаратов обычно лежит в пределах от 1,0 до 3,0 кг/м³.



Рис. 1. Лабораторный поперечно-поточный классификатор с жалюзийной решеткой

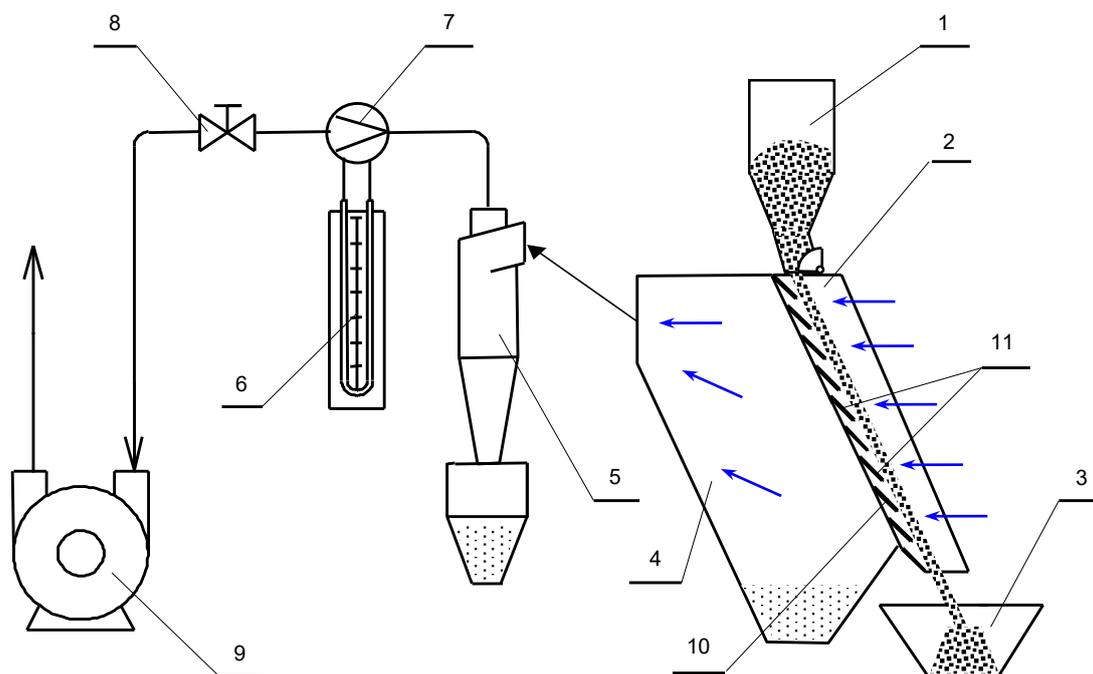


Рис. 2. Схема стенда для испытания классификатора с жалюзийной решеткой

1 – питатель, 2 – классификатор, 3 – поддон крупного продукта, 4 – осадительная камера, 5 – циклон с бункером, 6 – U-образный водяной манометр, 7 – диафрагма, 8 – вентиль, 9 – вакуум-насос ВВН-12, 10 – жалюзийная решетка, 11 – пластины жалюзийной решетки

Особенностью данного классификатора является организация каскадного принципа разделения за счет многократной перечистки крупного продукта, который сыпается сверху вниз по жалюзийной решетке. На промышленных классификаторах длина решетки может достигать 2 метра и более, а число щелей между

пластинами существенно больше, чем в лабораторном классификаторе. Поэтому, как показывает опыт эксплуатации, эффективность разделения промышленных классификаторов обычно выше, чем лабораторных.

Для примера в табл. 1 представлены результаты разделения кварцевого песка Ташлинского ГОКа в лабораторном классификаторе. Была поставлена задача отделения частиц менее 200 мкм. Для этого подбиралась скорость поперечного воздушного потока, которая составила $w = 0,8$ м/с на полное сечение жалюзий-

ной решетки. Производительность по исходному питанию составила $\Pi = 213,9$ кг/ч; расход воздуха – $Q = 62,4$ м³/ч; расходная концентрация материала – $\mu = 3,42$ кг/м³. Выход крупного продукта разделения по массе составил $G_k = 76,5$ %, а мелкого $G_m = 23,5$ %. Сопротивление классификатора составило $\Delta P = 0,1$ кПа.

Таблица 1

Результаты разделения песка Ташлинского ГОКа при $w = 0,8$ м/с*

№ i	Размер сит, мкм		Гранулометрический состав продуктов, %						Степень фракционного извлечения, %	
			Исходный		Мелкий		Крупный			
	x_i	$x_{\text{ср}}$	R_i	r_i	$R_{\text{им}}$	$r_{\text{им}}$	$R_{\text{ик}}$	$r_{\text{ик}}$	$\Phi_{\text{им}}$	$\Phi_{\text{има}}$
1	1000	1500,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	630	815,0	0,46	0,46	0,00	0,00	0,60	0,60	0,00	0,00
3	400	515,0	15,68	15,22	0,00	0,00	20,50	19,90	0,00	0,18
4	315	357,5	40,72	25,04	2,41	2,41	52,50	32,00	2,27	3,41
5	200	257,5	95,05	54,33	80,90	78,49	99,40	46,90	33,99	33,64
6	160	180,0	99,53	4,48	97,99	17,09	100,00	0,60	89,75	90,28
7	100	130,0	99,98	0,45	99,90	1,91	100,00	0,00	100,00	99,24
8	63	81,5	100,00	0,02	100,00	0,10	100,00	0,00	100,00	99,98
9	0	31,5	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00

*В таблице приняты следующие обозначения: $x_i, x_{\text{ср}}$ – соответственно размер ячеек сит и средний размер узких классов крупности, мкм; $R_i, R_{\text{им}}, R_{\text{ик}}$ – соответственно полные остатки на i -ой сетке исходного, мелкого и крупного продуктов разделения, %; $r_i, r_{\text{им}}, r_{\text{ик}}$ – соответственно частные остатки на i -ой сетке исходного, мелкого и крупного продуктов разделения; $\Phi_{\text{им}}$ – экспериментальные значения степени фракционного извлечения узких классов крупности в мелкий продукт, %; $\Phi_{\text{има}}$ – аппроксимация степени фракционного извлечения узких классов крупности в мелкий продукт функцией Плита.

Для определения границы разделения экспериментальные значения степени фракционного извлечения были аппроксимированы двухпараметрической функцией Плита [9]

$$\Phi_{\text{има}}(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^p}. \quad (1)$$

В качестве параметров в функции (1) Плита используются x_{50} – граница разделения и p – параметр эффективности разделения, который связан с критерием эффективности разделения Едера–Майера $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25}$ зависимостью

$$E = 100 \left(\frac{1}{9}\right)^{1/p}. \quad (2)$$

Подбор параметров аппроксимации производился с помощью встроенного в Excel метода «Поиск решения». Минимизировалось среднеквадратичное отклонение экспериментальных и расчетных данных:

$$\sum_{i=1}^n (\Phi_{\text{им}} - \Phi_{\text{има}})^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Как показали расчеты, выполненные по приведенным зависимостям, граница разделения со-

ставляла $x_{50} = 236,8$ мкм. Эффективность разделения при этом высокая и по показателю Едера–Майера составляет $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25} = 76,3$ %. На рисунке 3 поз. 1 представлена кривая фракционного разделения – степень фракционного извлечения в мелкий продукт.

В качестве другого примера в табл. 2 представлены результаты разделения песков Сухринского карьера по крупной границе с целью отделения гальки [10]. Производительность по исходному питанию составила $\Pi = 490,9$ кг/ч, расход воздуха – $Q = 212$ м³/ч, расходная концентрация материала – $\mu = 2,32$ кг/м³, скорость воздушного потока на полное сечение жалюзийной решетки – $w = 3,0$ м/с; выход мелкого (готового) продукта разделения составил $G_m = 90,79$ %, выход крупного продукта разделения (отсев) – $G_k = 9,21$ %. Сопротивление классификатора составило $\Delta P = 0,3$ кПа. Из представленных данных следует, что граница разделения составляет $x_{50} = 875,2$ мкм, эффективность разделения при этом высокая и по показателю Едера–Майера составляет $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25} = 72,0$ %. Построена кривая фракционного разделения узких фракций в мелкий продукт (см. рисунок 3 поз. 2). На рисунке 4 приведена фотография крупного и мелкого продуктов разделения песка Сухринского карьера [10].

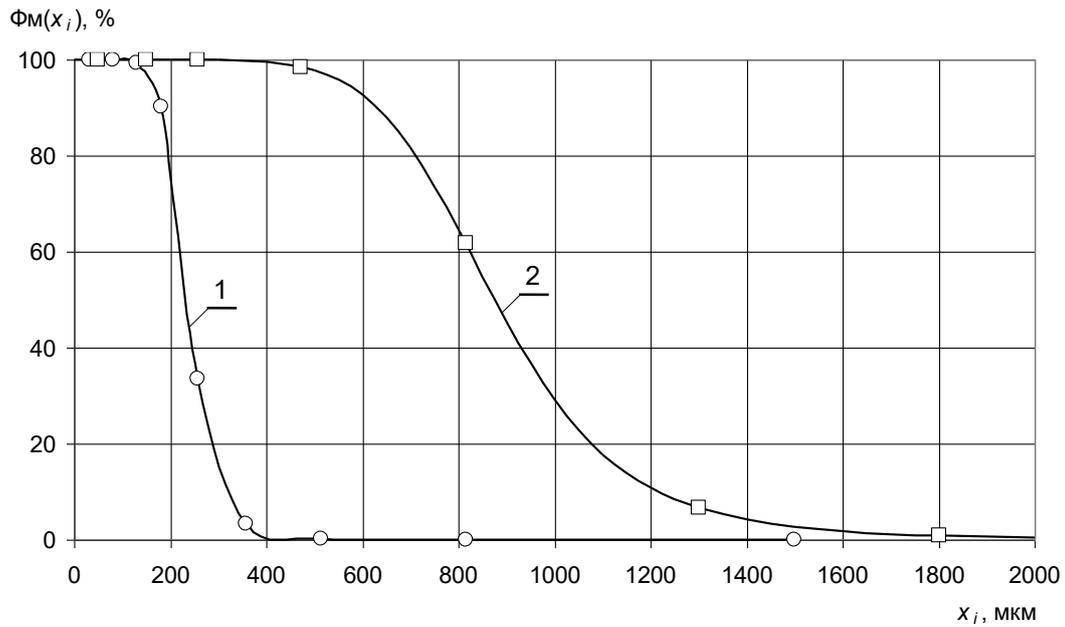


Рис. 3. Степень фракционного извлечения в мелкий продукт

Таблица 2

Результаты разделения песка Сухринского карьера по крупной границе разделения

№ i	Размер сит, мкм		Гранулометрический состав продуктов, %						Степень фракционного извлечения, %	
			Исходный		Мелкий		Крупный			
	x_i	$x_{иср}$	R_i	r_i	$R_{им}$	$r_{им}$	$R_{ик}$	$r_{ик}$	$\Phi_{им}$	$\Phi_{има}$
1	2500	3125,0	1,62	1,62	0,00	0,00	0,00	17,54	0,00	0,02
2	2000	2250,0	2,21	0,59	0,00	0,00	23,95	6,41	0,00	0,18
3	1600	1800,0	2,90	0,69	0,00	0,00	31,46	7,52	0,00	0,80
4	1000	1300,0	5,65	2,75	0,20	0,20	59,32	27,86	6,61	6,63
5	630	815,0	14,17	8,52	6,00	5,80	94,69	35,37	61,78	61,70
6	315	472,5	33,21	19,05	26,50	20,50	99,40	4,71	97,72	98,41
7	200	257,5	53,92	20,71	49,30	22,80	99,50	0,10	99,96	99,97
8	100	150,0	90,36	36,43	89,40	40,10	99,80	0,30	99,92	100,00
9	0	50,0	100,00	9,64	100,00	10,60	100,00	0,20	99,81	100,00



Рис. 4. Продукты разделения песка Сухринского карьера по крупной границе [10]

Расчетные модели. Расчет жалюзийной решетки. Единичный акт разделения происходит при проходе частиц материала через зазор между пластинами решетки. Необходимо, чтобы этот единичный акт разделения протекал эффективно, а скорость поперечного воздушного потока соответствовала заданной границе разделения. Для этого необходимо как расчетным, так и экспериментальным способом подобрать геометрические параметры решетки.

В настоящее время для расчета двухфазных потоков используются специальные программы вычислительной гидромеханики CFD (*Computational Fluid Dynamics: SolidWorks Flow Simulation, ANSYS CFX, FlowVision, KompasFlow, CADFlo* и др.) [11, 12].

Для проверки геометрии элементов решетки промышленного аппарата был выполнен расчет траекторий частиц с помощью программного комплекса *SolidWorks FlowSimulation* на основе метода конечных элементов (МКЭ) [13]. Проектирование промышленного классификатора производилось с целью удаления частиц размером менее 200 мкм – наиболее загрязненной части песка по заданию Ташлинского ГОКа.

Расчет проводился для различных конструктивных параметров жалюзийных решеток. Варьировались длина пластин и зазор между ними. В результате расчета была выбрана оптимальная конструкция. Жалюзийная решетка должна быть беспровальной, т. е. даже при отсутствии потока воздуха материал должен скатываться по решетке вниз и не проваливаться под решетку. Угол наклона жалюзийной решетки не должен быть слишком маленьким, чтобы обеспечить движение в условиях прижимного воздействия

потока воздуха. Например, если материал достаточно мелкий, или плохо сыпучий, то он может прижиматься к решетке, и плохо скользить по пластинам. Как показали испытания по разделению песка и расчеты, оптимальным углом наклона решетки к горизонту является $\alpha = 65^\circ$, угол наклона пластин $\beta = 45^\circ$. Длина пластин должна быть оптимальной по длине. Например, экспериментально установлено, что короткие пластины с мелким шагом не обеспечивают высокое качество разделения. Слишком длинные пластины сокращают число каскадов перемешивания крупного материала, снижают качество разделения, и приводят к увеличению габаритов решетки. Пластины жалюзийной решетки во время эксплуатации подвержены абразивному износу, поэтому они должны выполняться из стали стойкой к абразивному износу. Хорошо себя зарекомендовала в эксплуатации сталь *HARDOX* (*HARDOX 400, HARDOX 500, HARDOX 550*). Резку и сварку следует производить с соблюдением рекомендуемой технологии для данных марок стали. Возможна замена данной стали на отечественные аналоги.

Расчетная область и структура потока воздуха через фрагмент решетки оптимальных размеров представлена на рисунке 5. Длина пластин 80 мм, ширина решетки 600 мм, зазор между пластинами 30 мм, шаг решетки 76 мм, угол наклона решетки к горизонту 65° , угол наклона пластин к горизонту 45° . Полное сечение решетки $F_p = 0,2848 \text{ м}^2$. Живое сечение $F_{\text{ж}} = 0,084 \text{ м}^2$ ($F_{\text{ж}} = 24,4\%$). Расход воздуха через фрагмент решетки $Q = 0,2352 \text{ м}^3/\text{с}$. Скорость потока в зазоре $w_z = 3,27 \text{ м/с}$. Скорость потока $w = 0,8 \text{ м/с}$ на полное сечение решетки.

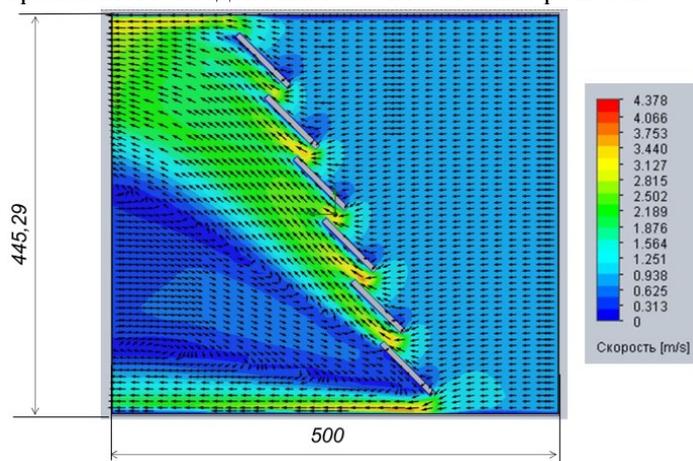


Рис. 5. Расчетная область фрагмента жалюзийной решетки промышленного аппарата

В данном поле скоростей воздушного потока производился расчет траекторий частиц с начальной скоростью частицы $v_x = v_y = -0,71 \text{ м/с}$. Данное значение было измерено экспериментально при сходе частиц песка с пластины лабо-

раторного классификатора. Условия на полке задавались коэффициентами нормального и тангенциального отражения $e_n = e_\tau = 0,5$. Массовый расход частиц 0,8 кг/с. Результаты расчета траекторий частиц разных фракций представлены на рисунке 6, 7.

Из представленных расчетных данных следует, что при скорости потока воздуха на полное сечение решетки $w = 0,8$ м/с и скорости потока $w_z = 3,27$ м/с в зазоре, все частицы размером 200 мкм и менее попадают в камеру осаждения, т. е. мелкий продукт разделения. Частицы размером

225 мкм также попадают в камеру осаждения. Частицы размером 250 мкм и 300 мкм попадают в крупный продукт разделения. Таким образом, граница разделения находится в интервале $x_{50} = 225...250$ мкм. Это удовлетворительно согласуется с данными лабораторных испытаний ($x_{50} = 236,8$ мкм).

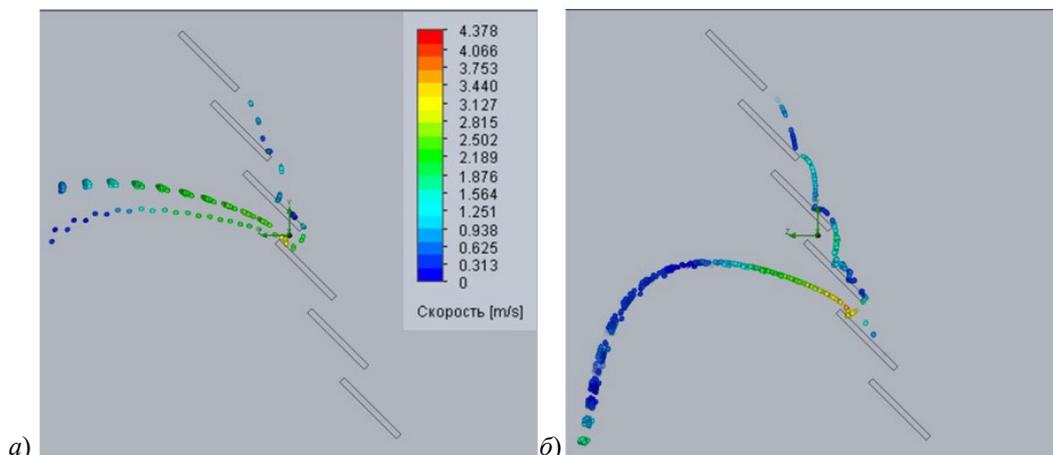


Рис. 6. Траектории движения частиц песка размером 200 и 225 мкм
а) фракция 200 мкм, б) фракция 225 мкм

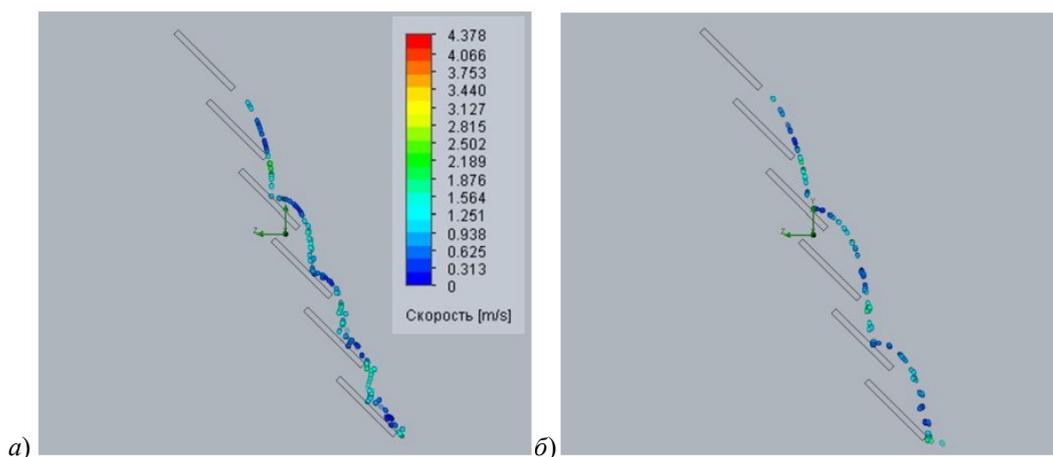


Рис. 7. Траектории движения частиц песка размером 250 и 300 мкм
а) фракция 250 мкм, б) фракция 300 мкм

Расчет камеры осаждения. Назначение камеры осаждения – отделение мелкого продукта от воздуха. Чем выше КПД камеры, тем меньше мелкого материала попадет в циклон. Оценку процесса осаждения можно выполнить по методике, описанной в [14].

Гранулометрический состав мелкого продукта в номинальном режиме приведен в таблице 2. Полные остатки можно аппроксимировать функцией Плита с параметрами $x_{50} = 22,26$ мкм и $p = 11,2877$. Около 80 % мелкого продукта составляет фракция 200...250 мкм. Расход воздуха через классификатор в номинальном режиме составляет $Q = 7896$ м³/ч. Как показали лабораторные испытания, выход мелкого продукта в номинальном режиме составляет $G_m = 23,5$ %. Выход

мелкого продукта по массе в соответствии с расчетом должен составить $G_m = 7050$ кг/ч. При этом расходная концентрация материала будет $\mu = 0,893$ кг/м³.

Для оценки процесса осаждения в камере классификатора произведем расчет траекторий частиц размером 200, 160, 100 мкм. Рассмотрим уравнение движения сферической частицы в поперечном потоке. В качестве исходных данных примем следующие габариты аппарата: ширина 1,00 м, высота 4,05 м. Скорость поперечного потока воздуха на полное сечение принята $w_x = 0,54$ м/с. В неподвижной системе координат, показанной на рисунке 8, оно имеет вид [15]

$$m \frac{dV}{dt} = F_s + F_g + F_a, \quad (4)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости частицы, м/с; \mathbf{F}_s – сила сопротивления, Н; \mathbf{F}_g – сила тяжести, Н; \mathbf{F}_a – сила Архимеда, Н.

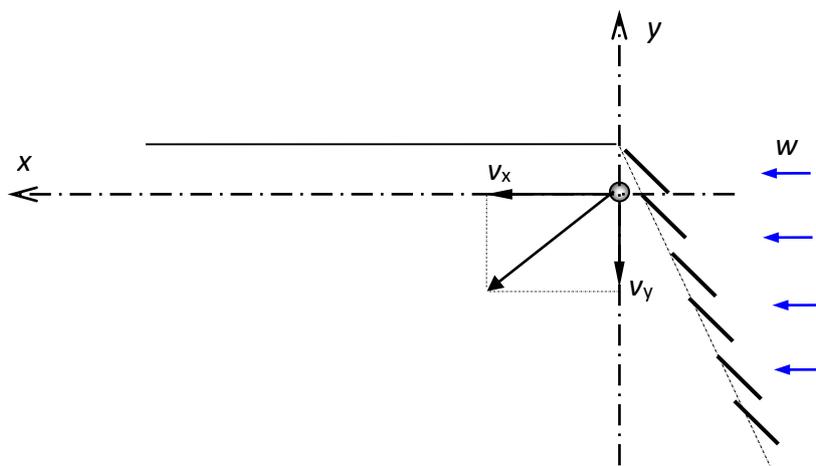


Рис. 8. Расчетная схема движения частиц в камере осаждения

При движении частицы в газе силой Архимеда \mathbf{F}_a можно пренебречь.

После некоторых упрощений, с учетом допущений по скорости потока $w_y = 0$, $w_x = w = \text{const}$, система примет вид

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{d\tau} = C_x A (w - v_x) \sqrt{(w - v_x)^2 + v_y^2}, \\ \frac{dv_y}{d\tau} = -C_x A v_y \sqrt{(w - v_x)^2 + v_y^2} - B, \\ \frac{dx}{d\tau} = v_x, \\ \frac{dy}{d\tau} = v_y, \end{cases} \quad (5)$$

где параметры A и B определяются выражениями:

$$A = \frac{3\rho}{8r\rho_t}, \quad (6)$$

$$B = \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho_t} g, \quad (7)$$

где ρ , ρ_t – соответственно плотность воздуха и плотность твердой частицы, кг/м³; r – радиус шарообразной частицы, м; g – ускорение свободного падения м/с².

Коэффициент сопротивления вычислялся по универсальной формуле Брауэра – Мьюса

$$C_x = 0,4 + \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (8)$$

Система уравнений (5) решалась методом прогноза и коррекции. В результате решения получены зависимости координат частицы от времени. На рисунке 9 представлены расчетные траектории движения частиц 100, 160 и 200 мкм в осадительной камере классификатора.

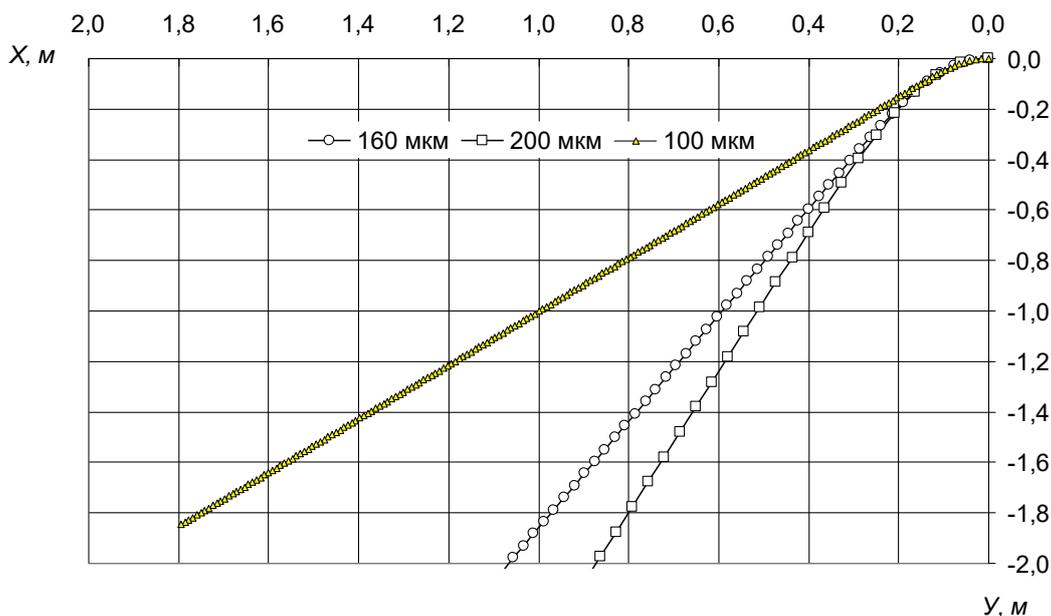


Рис. 9. Расчетные траектории движения частиц 100, 160 и 200 мкм в пылевой камере

Из представленных данных следует, что частицы крупнее 100 мкм должны улавливаться в камере осаждения длиной 2 м. Поскольку мелкий продукт разделения достаточно крупный (медианный размер $x_{50} = 227,26$ мкм см. табл. 1) то в пылевой камере должно улавливаться не менее 80...90 % частиц. Входная концентрация пылевых частиц на входе в циклон не превысит $\mu_{ц} = 10...20$ г/м³.

Промышленная реализация. В качестве примера, на рисунке 10 показаны фотографии эксплуатируемых классификаторов в промыш-

ленности. На рисунке 10.а представлен поперечно-поточный пневмоклассификатор для разделения каустического магнезита на ОАО «Комбинат Магнезит». Граница разделения регулируется в пределах от 0,1 до 0,3 мм. Производительность аппарата по исходному питанию составляет 9 т/ч. На рисунке 10.б представлен поперечно-поточный пневмоклассификатор для разделения песка на ОАО «Горнозаводскцемент». Граница разделения регулируется в пределах от 0,1 до 0,2 мм. Производительность аппарата по исходному питанию составляет 10 т/ч.



Рис. 10. Фотографии промышленных классификаторов с жалюзийной решеткой

Выводы.

1. На примере различных песков экспериментально показана возможность разделения сыпучих материалов по крупности частиц в классификаторе с жалюзийной решеткой в диапазоне 0,1...1,0 мм. Высокая острота разделения 76...72 % позволяет использовать эти классификаторы для удаления некондиционных мелких или крупных фракций.

2. Для проверки геометрии элементов решетки промышленного аппарата и достижения необходимой границы разделения приведен пример расчета жалюзийной решетки методом *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) с использованием программного комплекса *SolidWorks FlowSimulation* на основе метода конечных элементов (МКЭ). Результаты расчета границы разделения для заданной скорости поперечного воздушного потока $w = 0,8$ м/с согласуются с экспериментальными данными.

3. Пневмоклассификаторы с жалюзийной решеткой имеют камеру осаждения для снижения износа циклона. Приведено решение системы дифференциальных уравнений движения частиц методом прогноза и коррекции. В результате расчета показано, что для улавливания частиц размером 200, 160, 100 мкм длина камеры осаждения должна быть не менее двух метров.

4. Классификаторы с жалюзийной решеткой обладают высокой эффективностью разделения и могут быть рекомендованы для замены грохота. Малое аэродинамическое сопротивление поперечно-поточного классификатора обеспечивает низкие удельные затраты электроэнергии. Благодаря высокой износостойкости жалюзийной решетки срок ее эксплуатации на порядок выше, чем у сеток грохота и решается проблема их частой замены.

5. Граница разделения в классификаторе регулируется изменением расхода воздуха, который легко управляется частотой вращения вентилятора и может поддерживаться автоматически.

6. Классификатор работает под разрежением. Благодаря этому отсутствует пылевыведение и выполняются требования по экологичности процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ревнивцев В.И., Шпектор А.А. Обогащение формовочных песков. М.: НИИМАШ, серия С-IV, 1972. 67 с.
2. Дзюзер В.Я. Анализ гранулометрического состава кварцевого песка // Стекло и керамика. 2015. Т. 88. № 5. С. 29–32.
3. Shishkin S.F., Dzyuzer V.Ya., Shishkin A.S. Air Classification of Sands for the Glass Industry // Glass and Ceramics. 2001. Vol. 58. Iss. 11–12. Pp. 370–373.
4. Чередниченко Т.Ф., Тухарели В.Д., Абухба Б.А. Оптимизация зернового состава кварцевого песка – как фактор ресурсосбережения в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. С. 132–140.
5. Бауман А.В., Степаненко А.И., Степаненко А.А. Практические результаты и перспективы сухого обогащения руд и нерудных материалов методом пневмосепарации // Горный журнал. 2020. № 3. С. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07.
6. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. 327 с.
7. Ponomarev V.B. Dry processing of rock breaking waste // Gornyi Zhurnal. 2015. Vol. 2015. Iss. 12. Pp. 50–52.
8. Ponomarev V.B., Shishkin A.S. Methodology of Designing an Air Cascade Separator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012043.
9. Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Аномалия степени фракционного разделения в центробежных классификаторах // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2025. Т. 81. № 1. С. 62–68. DOI: 10.6060/snt.20258101.0007.
10. Пономарев В.Б., Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Фесун И.П. Пневмокласификация кварцевых песков в поперечно-поточном классификаторе // Стекло и керамика. 2024. Т. 97. № 12 (1164). С. 25–31. DOI: 10.14489/glc.2024.12.pp.025-031.
11. Tu J., Yeoh G.H., Chaoqun L. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Elsevier, 2019. 477 p.
12. Computational fluid dynamics. edited by ОН Н.В. London: IntechOpen, 2010. 428 p.
13. Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. Computational methods for fluid dynamics. 4-th edition. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.
14. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.
15. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 600 с.

Информация об авторах

Бараковских Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28.

Шишкин Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: 9022625282@mail.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28.

Шишкин Сергей Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: 9122493546@mail.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28

Поступила 01.07.2025 г.

© Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф., 2026

***Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F.**
 Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
 *E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru

SEPARATION OF BULK MATERIALS IN A CROSS-FLOW CLASSIFIER WITH A LOUVERED GRID

Abstract. Experimental studies were conducted, demonstrating the feasibility of using a transverse-flow classifier with a louvered grating for the efficient size classification of bulk materials with particle sizes ranging from 0.1 to 1.0 mm. The experiments were performed using quartz sands from the Tashlinsky and Sukhrinsky quarries. The design of the louvered grating involved CFD modeling to calculate its structural elements. The settling chamber of the classifier was analyzed by solving a system of differential particle motion equations using a predictor-corrector method. The computational results align well with experimental data, confirming the applicability of these methods for industrial-scale equipment design. A key feature of the louvered classifier is its cascade separation principle, achieved through multiple re-cleaning of the coarse product as it descends along the louvered grating. This ensures high separation efficiency, making the classifier suitable for industrial processing of various bulk materials. The air consumption required for pneumatic classification is comparable to that used in screen aspiration systems. The cut size can be adjusted over a wide range by varying the airflow rate. Additionally, the louvered grating classifier exhibits low aerodynamic resistance, resulting in reduced specific energy consumption by the fan.

Keywords: bulk materials, sand, particle size distribution, separation cut point and efficiency, fractional separation curve.

REFERENCES

1. Revnivcev V.I., Shpektor A.A. The Enrichment of Molding Sands [Obogashchenie formovochnykh peskov]. M.: NIIMASH, Series C-IV, 1972. 67 p. (rus)
2. Dzyuzer V.Ya. The Analysis of the Granulometric Composition of Quartz Sand [Analiz granulometricheskogo sostava kvarcevoogo peska]. Steklo i Keramika. 2015. Vol. 88. No 5. Pp. 29–32. (rus)
3. Shishkin S.F., Dzyuzer V.Ya., Shishkin A.S. Air Classification of Sands for the Glass Industry. Glass and Ceramics. 2001. Vol. 58. Iss. 11–12. Pp. 370–373.
4. Cherednichenko T.F., Tuhareli V.D., Abuhba B.A. Optimization of Quartz Sand Grain Composition as a Resource-Saving Factor in Construction [Optimizaciya zernovogo sostava kvarcevoogo peska – kak faktor resursosberezheniya v stroitel'stve]. Inzhenernyj Vestnik Dona. 2016. No 4. Pp. 132–140. (rus)
5. Bauman A.V., Stepanenko A.I., Stepanenko A.A. Practical Results and Prospects of Dry Beneficiation for Ores and Non-Metallic Materials via Pneumatic Separation [Prakticheskie rezul'taty i perspektivy suhogo obogashcheniya rud i nerudnykh materialov metodom pnevmoseparacii]. Gornyj zhurnal. 2020. No 3. Pp. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07. (rus)
6. Barskij M.D. The Fractionation of Powders [Frakcionirovanie poroshkov]. Moscow: Nedra, 1980. 327 p. (rus)
7. Ponomarev V.B. Dry Processing of Rock Breaking Waste. Gornyi Zhurnal. 2015. Vol. 2015. Iss. 12. Pp. 50–52.
8. Ponomarev V.B., Shishkin A.S. Methodology of Designing an Air Cascade Separator. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. No 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012043.
9. Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S. F. The Anomaly of the Fractional Separation Degree in Centrifugal Classifiers [Anomaliya stepeni frakcionnogo razdeleniya v centrobezhnykh klassifikatorah]. Modern High Technologies. Regional Application. 2025. Vol. 81. No 1. Pp. 62–68. DOI: 10.6060/snt.20258101.0007. (rus)
10. Ponomarev V.B., Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Fesun I.P. Pneumatic Classification of Quartz Sands in a Cross-Flow Classifier [Pnevmoklassifikaciya kvarcevykh peskov v poperechno-potochnom klassifikatore]. Steklo i Keramika. 2024. Vol. 97. No 12 (1164). Pp. 25–31. DOI: 10.14489/glc.2024.12.pp.025–031. (rus)
11. Tu J., Yeoh G.H., Chaoqun L. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Elsevier, 2019. 477 p.
12. Computational fluid dynamics. edited by OH H.W. London: IntechOpen, 2010. 428 p.
13. Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. Computational methods for fluid dynamics. 4-th edition. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.
14. Vasilevskij M.V. Gas Dedusting by Inertial Apparatuses [Obespylivanie gazov inercionnymi apparatami]. Tomsk: Publisher House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 258 p. (rus)
15. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Gas flow with Particles [Techeniya gaza s chasticami]. Moscow: FIZMATLIT, 2008. 600 p. (rus)

Information about the authors

Barakovskikh, Dmitry S. PhD. E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Shishkin, Alexey S. PhD. E-mail: 9022625282@mail.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Shishkin, Sergey F. PhD. E-mail: 9122493546@mail.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Received 01.07.2025

Для цитирования:

Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Разделение сыпучих материалов в поперечно-поточном классификаторе с жалюзийной решеткой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 73–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83

For citation:

Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F. Separation of bulk materials in a cross-flow classifier with a louvered grid. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 73–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-84-92

Кожевников В.А.*Приволжский государственный университет путей сообщения**E-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВОДООБРУШИТЕЛЯ В БУНКЕРЕ

Аннотация. В статье рассматриваются важные вопросы моделирования и оптимизации работы сводообрушителей, устройств, предназначенных для разрыхления слежавшегося материала в бункерах, что является актуальной задачей в горной, строительной и перерабатывающей промышленности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности процессов разгрузки, а также снижением энергетических затрат и увеличением производительности оборудования. В работе разработаны и проанализированы математические модели, основанные на теории сил резания и механике сыпучих сред, что позволило сформировать аналитические выражения для действующих сил, моментов и мощности, затрачиваемых на разрыхление материала. В статье подробно исследуются влияние конструктивных и режимных параметров (длина рабочих органов, скорость подачи, угловая скорость вращения и размеры поперечного сечения) на энергетические показатели устройства и его эффективность. Проведен анализ зависимости мощности от этих параметров, выявлены оптимальные диапазоны для минимизации затрат энергии при сохранении высокой эффективности выгрузки. Также учтены физико-механические свойства материалов, такие как плотность, трение и слеживаемость, что расширяет возможности практической адаптации моделей к различным условиям эксплуатации. Полученные результаты способствуют более точному проектированию и повышению эффективности сводообрушителей, а также расширяют их перспективы применения в различных технологических и производственных условиях.

Ключевые слова: сводообрушитель, разрыхление материала, бункер, сводообразование, рабочий орган, конструктивно-режимные параметры, рыхление.

Введение. Бункерные емкости различной конструкции широко используются для хранения и транспортировки сыпучих материалов, в том числе, склонных к слеживанию. Среди многообразия конструкций бункеров наиболее эффективны те, что способны адаптироваться к специфике разнообразных материалов. Стремление к универсализации конструкции бункера обуславливает необходимость глубокого изучения процессов сводообразования и разработки методов разрушения сводов, включая применение специализированных механических устройств. В научной литературе представлено множество попыток создания теоретических методик, позволяющих комплексно учитывать факторы, влияющие на динамику выгрузки материалов из бункера. Эти методики учитывают не только физико-механические свойства материалов и условия окружающей среды, но и взаимосвязь конструктивно-режимных параметров бункера и интегрированного в него стационарного сводообрушителя.

Достаточно приемлемым способом контроля сводообразования и стимулирования гравитационного способа истечения может стать внедрение технологий предотвращения сегрегации частиц при загрузке бункера. Однако

они в большей степени адаптированы к высоким хранилищам силосного типа [1, 2].

Оценке энергоемкости комбинированного гравитационно-принудительного процесса разгрузки щелевых бункеров с использованием скребковых питателей посвящены обширные исследования. Теоретическое описание работы цилиндрического бункерного устройства, рабочий орган которого расположен в щелевом отверстии между подъемным кольцевым затвором и косвенной заслонкой, позволили обосновать режимы энергосбережения при выгрузке материала сочетающей в себе гравитационное истечение с принудительным боковым выносом [3].

Изучено влияние различных физико-механических свойств трудно-сыпучих грузов на процесс их истечения из бункера. С помощью кольцевого сдвигового испытателя «Jenike (RST)» получены критические уровни влажности, отрицательно влияющие на свойства текучести материала при его взаимодействии с различными материалами футеровки внутренней поверхности бункера [4].

Метод дискретных элементов (DEM) широко используется для моделирования сводообразования и процесса выгрузки тонкодисперсных материалов из бункерных емкостей. Изучение поведения материала

истекающего из бункера под действием вибрации, а также измерение пропускной способности выпускного отверстия бункера может производиться на основе анализа изображений, полученных с помощью экспериментальной установки [5].

При рассмотрении бункера имеющего плоское днище исследование перехода сыпучего материала из слежавшегося состояния в стабильно текучее может быть осуществлено с помощью стеклянных шариков разного калибра [6].

На основе уравнения текучести Мора-Клона удалось получить математическую модель двухмерного свода, представленную уравнениями баланса вертикальных и горизонтальных напряжений хранимого в бункере сыпучего материала в плоской системе координат. Решение этих уравнений с использованием численного способа Эйлера позволяет для конкретных условий хранения сыпучего груза прогнозировать форму кривой свода и устанавливать ее взаимосвязь с габаритами конического бункера и критическими размерами его выпускного отверстия [7].

Установлено, что при введении в основной хранимый в бункере материал некоторого количества мелкодисперсных частиц с низким коэффициентом трения, снижает интенсивность сводообразования и ускоряет выпуск материала. По мере увеличения доли мягких частиц в смеси (до определенного предела) увеличивается скорость потока, характер которого приобретает лавинообразность и прерывистость. Образующиеся при этом своды имеют временный характер, саморазрушаются и не вызывают блокирования потока выпускаемого материала [8].

Стационарное размещение механических сводообрушителей повышающих эффективность разгрузки рекомендуется для улучшения условий истечения материалов из бункеров с улучшенной геометрией. Такой подход позволил к

настоящему времени разработать и внедрить целую систему разнообразных конструкций [9]. Однако, в случае бункеров, находящихся в эксплуатации длительное время и демонстрирующих неудовлетворительные показатели выгрузки, предлагается использование сводообрушителей селективного действия.

Локальное применение данных устройств в зоне формирования свода позволяет осуществлять выгрузку слежавшихся материалов без повреждения конструктивных элементов бункера. Такой подход исключит необходимость применения активных вибрационных или ударных воздействий и позволит сохранить целостность бункера при извлечении сильно слежавшегося материала, предотвратив срезание части воронки.

Материалы и методы. В исследовании использовались стандартные исходные данные и параметры, характерные для пшеничных отрубей (угол внутреннего трения $\beta = 35^\circ$, коэффициент внешнего трения $f = 0,5$, насыпная плотность $\rho = 400 \text{ кг/м}^3$). Для моделирования процессов разрыхления и работы устройства применялись математические модели, основанные на теории сил резания и механике сыпучих сред.

Основой исследования являлись аналитические методы и численные расчеты. Были разработаны математические модели, описывающие силы, моменты и мощность, затрачиваемые на разрыхление материала, с учетом конструктивных и режимных параметров устройств. Для выполнения расчетов и анализа зависимостей показателей от параметров использовались методы оптимизации и графического моделирования.

Основная часть. Предложен ряд устройств [10, 11, 12], некоторые из которых представлены на рис. 1. Рабочие органы этих механизмов, представляющие собой скребки или лопасти различной конфигурации, вводятся в полость бункера через специализированные технологические отверстия, расположенные в зонах наибольшего вероятного уплотнения трудноссыпучего материала.

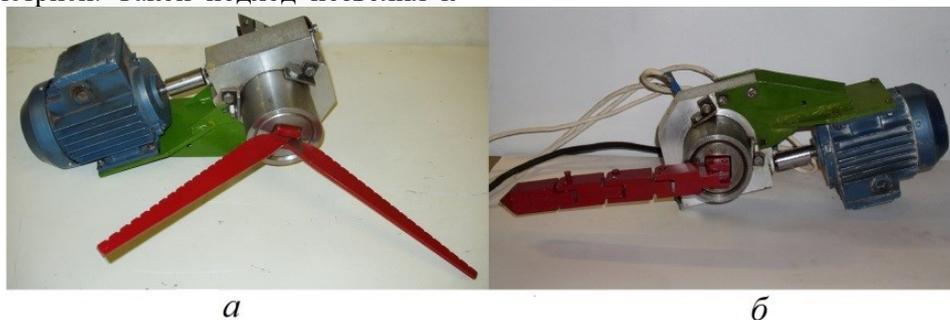


Рис. 1. Переносные сводообрушители
а) рабочие органы скребкового типа; б) рабочие органы звеньев

Отверстия для ввода рабочих органов предлагается оборудовать герметичными заглушками. Конструкция также предусматривает изменение степени охвата внутреннего пространства бункера и возможность остановки процесса по достижении стабильного истечения материала.

Детальный анализ сводообрушения, начиная с ввода рабочих органов в бункер и заканчивая полной его выгрузкой (очисткой), позволяет разделить процесс на несколько этапов (рис. 2).

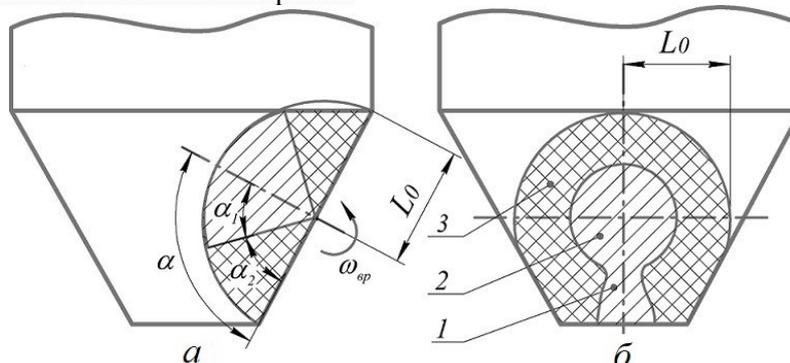


Рис. 2. Работа устройства
а) вид сбоку; б) вид спереди

1 – перегородка из материала; 2, 3 – объемы разрыхления $V_{\alpha_1}, V_{\alpha_2}$

Этап 1 – инициирование разгрузки, во время которого происходит рыхление материала в нижней части бункера (около выпускной воронки) с образованием разуплотненной массы материала. Объем V_{α_1} сосредоточения этой массы соответствует объему сектора сферы, образованного отклонением рабочего органа от оси вращения на угол α_1 (не более 90° у вершины сектора). Повышение давления в результате локального воздействия на материал способствует частичному разрушению перегородки из уплотненного материала, расположенной между объемом V_{α_1} и выпускным отверстием. В результате образуется канал для выгрузки.

сопротивление движению определяется преимущественно давлением разуплотненного материала. На второй и третьей стадиях доминирующим фактором сопротивления становится угол отклонения рабочего органа от оси вращения.

Этап 2 – расширение зоны разгрузки. Здесь происходит дальнейшее разрыхление материала и его выгрузка из области, ограниченной углом отклонения рабочего органа $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1$, где объем разрыхленного материала обозначен $V_{\alpha_2} = V_\alpha - V_{\alpha_1}$. Образованная этим объемом полусфера, ограничена максимальным отведением рабочего органа от оси вращения до соприкосновения с внутренней поверхностью бункера (угол α).

Для каждой стадии процесса разрыхления предлагается получить формульные выражения затрачиваемой мощности. Это позволит выполнить конструкторские расчеты устройства и его рабочих органов, оптимизируя конструктивно-режимные параметры (геометрические размеры, скорости движения) для достижения максимальной эффективности.

Разработка теоретического обоснования процесса рыхления слежавшегося материала рабочим органом сводообрушителя может быть основана на применении теоретических инструментов, заимствованных из теории резания металлов или грунтов.

Стадия 3 – финальная очистка. Заключительная стадия процесса по удалению остатков материала со стенок бункера, образовавшихся в результате адгезии. Эти остатки могут служить опорой для материала, расположенного выше выпускной воронки (в основной части бункера), и препятствовать полной выгрузке.

Изучение взаимодействия обрабатываемой поверхности заготовки с режущим инструментом (рис. 3, а) выявляет сложную взаимосвязь между множеством параметров, включающих составляющие силы резания (P_z, P_y и P_x), подачу s и глубину резания t :

$$\left. \begin{aligned} P_z &= C_{pz} t^{x_p} s^{y_p} \\ P_y &= C_{py} t^{x_p} s^{y_p} \\ P_x &= C_{px} t^{x_p} s^{y_p} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $C_{pz}, C_{py}, C_{px}, x_p, y_p$ – эмпирические константы, зависящие от свойств обрабатываемого материала, а также от подачи и глубины резания [13].

В процессе аналитического моделирования процессов резания для установления взаимосвязи между отдельными силовыми составляющими может использоваться ряд пропорциональных коэффициентов: $P_z:P_y:P_x = 1:(0,4...0,5):(0,25...0,3)$ [14].

Трехмерная модель, представленная на рис. 3, а, демонстрирует наличие трех компонентов силы резания, обусловленное сложным движением материала заготовки относительно реза: вращательным (главная составляющая P_z), продольным (P_x) и поперечным (P_y). В отличие от этого, движение рабочих органов переносного сводообрушителя в бункере обусловлено фиксированным положением разрыхляемого материала.

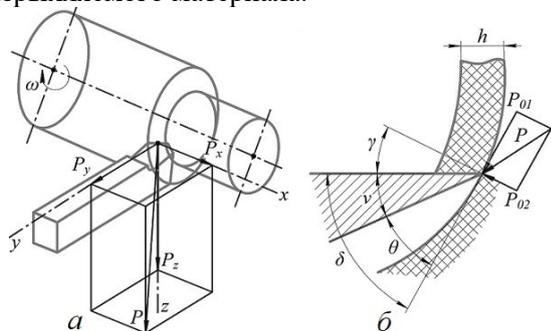


Рис. 3. Силы взаимодействия рабочих органов с материалами
 а) режущего инструмента с металлами;
 б) ножевого рабочего органа землеройной машины с грунтом

Применение формул, основанных на теории резания металлов, для расчета параметров сводообрушителя затруднено наличием большого числа эмпирических коэффициентов. Определение этих коэффициентов требует проведения лабораторных экспериментов с использованием специализированного оборудования (датчиков, динамометров), адаптированного к специфике движения рабочих органов сводообрушителя.

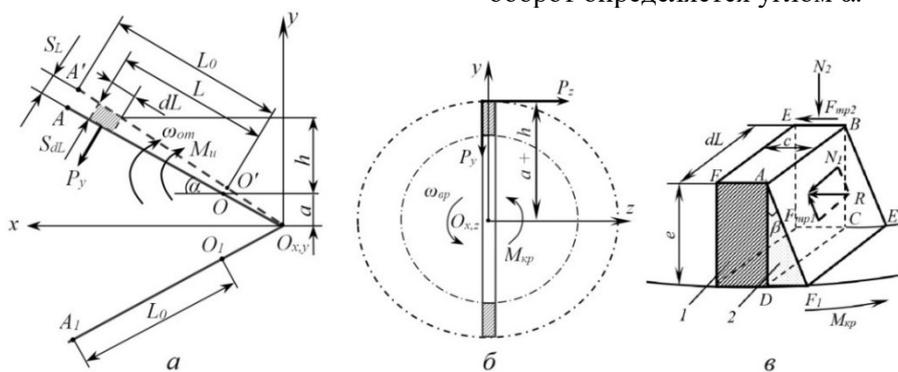


Рис. 4. Схема к определению действующих на рабочий орган нагрузок
 а) силы резания (вид сбоку); б) силы резания (вид спереди); в) силы лобового и бокового сопротивления со стороны разрыхленного материала
 1 – сечение рабочего органа; 2 – тело волочения

Воздействие рабочих органов землеройной машины на грунт, несмотря на образование стружки толщиной h , можно охарактеризовать наличием только двух составляющих силы резания (рис. 3, б):

$$P_{02} = \psi P_{01}, \quad P_{01} = kbh, \quad (2)$$

где ψ – коэффициент показывающий связь между отдельными силовыми составляющими, зависящий от режима работы и от характера геометрии взаимодействия режущей части ножа с грунтом (углы $\theta, \gamma, \nu, \delta$); k – коэффициент удельного сопротивления, Н/м²; b – размер режущей кромки ножа, м; h – высота срезаемого слоя, м [15].

Двухмерная модель, представленная на рис. 3, б, обусловлена преимущественно плоским движением механизма. Это делает теорию резания грунта потенциально более подходящей для описания работы сводообрушителя при определенных условиях, упрощая расчеты за счет меньшего числа параметров и более простой геометрии взаимодействия.

Работа устройства по разуплотнению материала в зоне $V_{\alpha 1}$ (рис. 2) требует затрат мощности как на само разрыхление (резание), так и на преодоление сил трения в разрыхленном материале.

На рис. 4, а, б представлены схемы, поясняющие условно плоское движение бесконечно малого сегмента рабочего органа длиной dL . На участках OA и O_1A_1 двух рабочих органов длиной L_0 , участвующих в процессе разрыхления, действуют окружная (P_z) и радиальная (P_y) составляющие силы резания.

Координата L расположения бесконечно малого сегмента dL определяет глубину резания, а подача в направлении смещения одного из рабочих органов из положения OA в $O'A'$ при отклонении от оси вращения за один оборот определяется углом α .

Если подача в точке A имеет величину S_L , то в месте расположения бесконечно малого сегмента она станет равной:

$$S_{dL} = S_L \cdot L/L_0. \quad (3)$$

Таким образом, глубина резания изменяется вдоль рабочего органа в зависимости от положения бесконечно малого сегмента dL .

Элементарные величины окружной и радиальной составляющих силы резания, действующие на сегмент dL , аналогично выражениям (2), могут быть представлены так:

$$dP_y = \psi' dP_z, \quad dP_z = k' \left(S_L \frac{L}{L_0} \right) dL, \quad (4)$$

где k' – эмпирический коэффициент, учитывающий остающиеся постоянными факторы, влияющие на окружную силу резания, Н/м²; ψ' – коэффициент, учитывающий характер движения рабочего органа (вращение с угловой скоростью $\omega_{\text{вр}}$ и одновременное отклонение с угловой скоростью $\omega_{\text{от}}$), когда наблюдается некоторое преобладание радиальной составляющей силы резания над окружной.

Интегрируя выражения (4) по длине L_0 и углу отклонения α рабочего органа, можно получить полные величины составляющих силы резания P_z , P_y и создаваемые ими крутящий ($M_{\text{кр}}$) и изгибающий (M_u) моменты:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= \frac{k'S_L L_0}{2} \\ P_y &= \psi' P \\ M_{\text{кр}} &= k'S_L \left(\frac{aL_0}{2} + \frac{L_0^2 \sin \alpha}{3} \right) \\ M_u &= \frac{k'\psi'S_L L_0^2}{3} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Используя полученные выражения для моментов (5), можно определить мощность, необходимую для разрыхления:

$$N_{\text{раз}} = k'S_L \left[\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{3\pi} \right) L_0 + \frac{\psi' L_0^2}{3 \sin \omega_{\text{от}} t} \right] \omega_{\text{вр}}, \quad (6)$$

где $\omega_{\text{вр}}$, $\omega_{\text{от}}$ – соответственно угловые скорости относительного движения (поворота плюс отклонение), рад/с; $\omega_{\text{от}} t = \alpha$ – угол отклонения, рад; t – время процесса, с; a – величина проекции отрезка рабочего органа на ось Y (в виду особенностей конструкции может быть выведен из взаимодействия с сыпучим материалом), м.

При движении рабочего органа в разрыхленном материале преодолевается общее сопротивление, состоящее из лобовой (\vec{F}_L) и боковой (\vec{F}_B) составляющих:

$$\vec{F} = \vec{F}_L + \vec{F}_B. \quad (7)$$

На рис. 4, в показан бесконечно малый сегмент dL рабочего органа с сечением 1 (заштриховано), расположенный на расстоянии L от оси вращения. В процессе работы кромкой CD рабочего органа подрезается слой материала толщиной AD , образуя тело волочения 2 (призма с треугольным основанием ADF_1).

Расположенная спереди вращающаяся грань ABE_1F_1 призмы, образованной на бесконечно малом сегменте рабочего органа, подвержена воздействию сил нормального давления (N_1) и трения ($F_{\text{мп1}}$) со стороны разрыхленного материала. В это же время нагрузки N_2 и $F_{\text{мп2}}$ приложены к верхней грани $ABEF$ отклоняемой в направлении подачи со скоростью $\omega_{\text{от}}$.

Нормальное давление со стороны разуплотненного материала, действующее по всей длине L рабочих органов, складывается из составляющих N_1 и N_2 , которые зависят от давления столба материала:

$$p = \rho g L, \quad (8)$$

где ρ – плотность материала после разуплотнения, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Элементарные составляющие лобового и бокового сопротивления, действующие на бесконечно малый сегмент dL рабочего органа, выражаются формулами:

$$\left. \begin{aligned} dN_1 &= \frac{pe}{\cos \beta} \cdot dL \\ dF_{\text{мп1}} &= fN_1 \\ dN_2 &= pc \cdot dL \\ dF_{\text{мп2}} &= fN_2 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где c , e – геометрические размеры сечения, м; β , f – соответственно угол внутреннего и коэффициент внешнего трения.

Векторная сумма всех составляющих лобового и бокового сопротивления, действующая на рабочий орган, равна:

$$d\vec{F}_{\text{comp}} = d\vec{N}_1 + d\vec{F}_{\text{мп1}} + d\vec{N}_2 + d\vec{F}_{\text{мп2}}. \quad (10)$$

Элементарная сила сопротивления, действующая со стороны разрыхленного

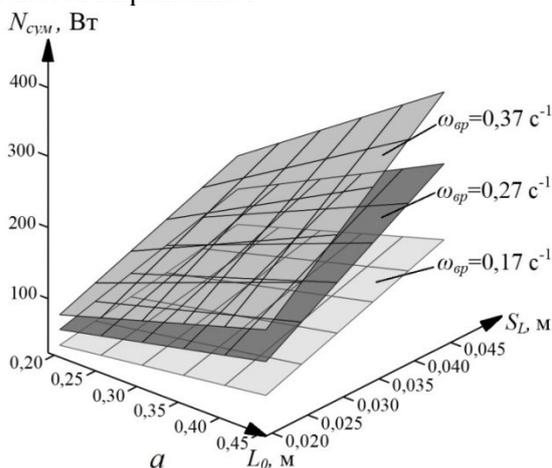
материала на бесконечно малом сегменте рабочего органа длиной dL с учетом (3) и (9):

$$dF_{conp} = \rho g L \left(\frac{e\sqrt{1+f^2}}{\cos\beta} + cf \right) dL. \quad (11)$$

Интегрируя (11) по длине L_0 и углу отклонения α , получаем полную силу сопротивления F_{conp} и соответствующий крутящий момент $M_{кр}^{conp}$:

$$\left. \begin{aligned} F_{conp} &= \rho g \frac{L_0^2}{2} \left(\frac{e\sqrt{1+f^2}}{\cos\beta} + cf \right) \\ M_{кр}^{conp} &= \rho g \left(\frac{e\sqrt{1+f^2}}{\cos\beta} + cf \right) \left(\frac{aL_0^2}{2} + \frac{L_0^3 \sin\alpha}{3} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Мощность, необходимая для преодоления сопротивления разрыхленного материала, определяется выражением:



$$N_{conp} = \rho g \left(\frac{e\sqrt{1+f^2}}{\cos\beta} + cf \right) \cdot \left(\frac{aL_0^2}{2} + \frac{L_0^2 \sin\alpha}{3} \right) \omega_{ep}. \quad (13)$$

На рис. 5, а представлена графическая взаимосвязь определяемой подстановкой формул (6) и (13) суммарной мощности $N_{сум} = N_{раз} + N_{conp}$ с основными конструктивно-режимными параметрами устройства: длиной рабочих органов ($L_0=0,20...0,45$ м), подачи ($S_L=0,020...0,045$ м) и угловой скоростью ($\omega_{ep}=0,17...0,37$ с⁻¹). Часть параметров при этом остается постоянными: $k' = 40$ кПа (давление столба материала); $a = 0,07$ м (высота скребка); $\psi' = 0,05$ (коэффициент, учитывающий преобладание окружной скорости над скоростью подачи, как следствие превосходство P_y над P_z); $\alpha = 90^\circ$ (предельный угол отклонения); $f = 0,6$, $\beta = 30^\circ$, $\rho = 1000$ кг/м³, $e = 0,025$ м, $c = 0,01$ м (другие параметры описанные выше).

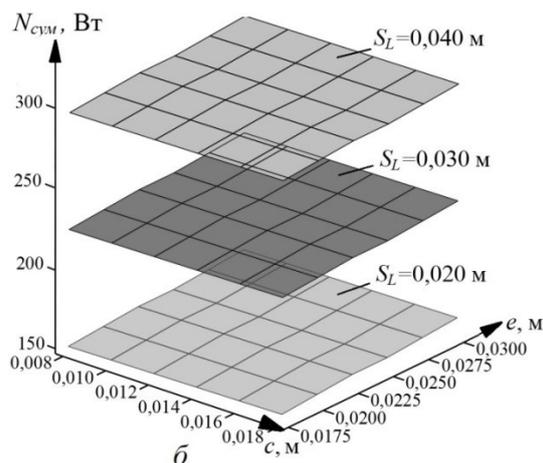


Рис. 5. Зависимость мощности от конструктивно-режимных параметров рабочих органов а) длины, подачи и частоты вращения; б) размеров поперечного сечения и подачи

На рис. 5, б показана взаимосвязь мощности и размеров поперечного сечения рабочих органов: $c = 0,008...0,018$ м и $e = 0,0175...0,0300$ м.

Выводы. Анализ графиков, представленных на рис. 5, а, показывает увеличение затрачиваемой мощности для всех рассматриваемых параметров в следующих пределах: $N_{сум} = 34...165$ Вт при $\omega_{ep} = 0,17$ с⁻¹; $N_{сум} = 56...271$ Вт при $\omega_{ep} = 0,27$ с⁻¹; $N_{сум} = 76...372$ Вт при $\omega_{ep} = 0,37$ с⁻¹.

Влияние длины рабочих органов L_0 на мощность обусловлено изменением объема взаимодействия с материалом. Оптимальное значение длины может быть выбрано в диапазоне $0,20...0,45$ м, исходя из условия достижения наиболее эффективной выгрузки бункера. Влия-

ние подачи S_L на мощность, согласно выражениям (5), связано только с изменением сил и моментов, действующих на рабочие органы. Подача не оказывает прямого влияния на объем разрыхляемого материала и, следовательно, на эффективность работы. Поэтому оптимальным значением подачи следует считать минимальное значение ($S_a = 0,020$ м), которое минимизирует затраты мощности и нагрузки на рабочие органы.

Снижение затрачиваемой мощности может быть достигнуто также за счет уменьшения угловой скорости вращения рабочих органов (ω_{ep}) до $0,17$ с⁻¹, при условии, что увеличение продолжительности работы устройства, связанное с уменьшением ω_{ep} , не оказывает негативного влияния на технологический процесс разгрузки.

Из анализа графиков на рис. 5, б, следует, что при фиксированных максимальных значениях длины ($L_0 = 0,45$ м) и угловой скорости ($\omega_{вр} = 0,37$ с⁻¹) изменение размеров поперечного сечения рабочих органов не оказывает существенного влияния на затраты мощности, о чем свидетельствует плоскостной характер изображения графиков. Однако затраты мощности заметно снижаются при уменьшении подачи: $N_{сум} = 295...298$ Вт при $S_L = 0,040$ м; $N_{сум} = 224...226$ Вт при $S_L = 0,030$ м; $N_{сум} = 153...155$ Вт при $S_L = 0,020$ м.

Разработанные математические выражения учитывают основные физико-механические свойства разрыхляемого материала и конструктивно-режимные параметры сводообрушителя, отражая характер движения его рабочих органов внутри бункера. Ключевым параметром, влияющим на мощность, затрачиваемую на разрыхление, является подача рабочих органов. Увеличение длины рабочего органа также приводит к росту мощности, но может быть оправдано только необходимостью увеличения объема разрыхления для обеспечения эффективной выгрузки материала.

Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании опытного образца устройства. В дальнейших исследованиях планируется разработка математических моделей работы сводообрушителей с другими конфигурациями рабочих органов, такими как гибкие скрепки и шарнирно-сочлененные звенья. Это позволит расширить область применения разработанной методики и оптимизировать конструкцию сводообрушителей для различных типов материалов и условий эксплуатации. Также перспективным направлением исследований является учет влияния ряда физико-механических свойств хранимого в бункере материала (угол внешнего и внутреннего трения, сцепление, насыпная плотность, гранулометрический состав, слеживаемость, влажность) на параметры процесса разрыхления и, соответственно, на затрачиваемую мощность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Третьяков Г.М., Прусов М.В., Денисов В.В., Кононов И.И. Экспериментальные исследования хранилища сыпучих грузов в транспортно-технологических комплексах // Вестник транспорта Поволжья. 2020. №5(83). С. 56–61.
2. Денисов В.В., Кононов И.И., Прусов М.В. Управление процессами загрузки, хранения и выгрузки зерновых грузов в транспортно-складских комплексах // Мир транспорта. 2022. Том 20. №2(99). С. 60–65. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-2-6.
3. Прусов М.В., Денисов В.В., Кононов И.И. Ресурсосбережение в транспортно-складских комплексах при эксплуатации бункерных систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №7. С. 121–125. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-121-122.
4. Reddy Y.V., Venkatesh S. Flow characteristic evaluation of iron ore for design of bunkers and chutes with different liner materials // Materials today: Proceedings. 2023. №76., Iss. 1. Pp. 95–102. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.132
5. Zhu J., Wang K., Ma Y., Xu W., Long J., Li X. Arch formation mechanism and discharge process of cohesive fine powder in a vibrated silo // Particology: Science and Technology of Particles. 2024. №94. Pp. 373–385. DOI: 10.1016/j.partic.2024.09.001.
6. Xue J., Schiano S., Zhong W., Chen L., Wu C.-Y. Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper // Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems. 2019. №358. Pp. 55–61. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.08.063.
7. Matchett A.J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos – Some theoretical considerations // Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems. 2007. №171, Iss. 3. Pp. 133–145. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.10.010.
8. Alborzi S., Hashmi S.M. Low-friction soft particles add intermittency and avalanches to the flow of rigid particles in a hopper // Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems. 2025. №459. 121000.
9. Кожевников В.А., Астраханский А.Ю., Жданов А.Г. Классификация сводообрушающих средств механизации выгрузки трудносыпучих грузов // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. №5. С. 56–58. DOI: 10.26160/2541-8637-2020-5-56-58.
10. Пат. 2190486, Российская Федерация, МПК В 08 В9/087. Переносной сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков; заявитель и патентообладатель ОАО «Промжелдортранс». №2000124913; заявл. 04.10.2000; опубл. 10.10.2002, Бюл. № 28. 6 с.
11. Пат. 2191078, Российская Федерация, МПК В 08 В9/08. Сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков, Е.П. Дудкин, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский, Е.В. Горюшинская; за-

явитель и патентообладатель ОАО «Промжелдортранс». № 2001110578; заявл. 19.04.2001; опубл. 20.10.2002, Бюл. № 29. 9 с.

12. Пат. 2201813, Российская Федерация, МПК В 08 В9/08. Переносной сводоразрушитель-очиститель / Г.М. Третьяков, В.С. Горюшинский, И.В. Горюшинский, В.Л. Шур, В.А. Кожевников; заявитель и патентообладатель ОАО «Промжелдортранс». № 2001102165; заявл. 23.01.2001; опубл. 10.04.2003, Бюл. № 10. 8 с.

13. Емельянов С.Г., Швец С.В., Ремнев А.И., Сергеев С.А., Павлов Е.В., Ремнева Л.А. Теория

резания: математическое моделирование и системный анализ : монография. Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2020. 312 с.

14. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Маслов А.Р. Высокоэффективные технологии обработки : монография. М.: Машиностроение, 2014. 455 с.

15. Берестов Е.И., Смоляр А.П. Сопротивление грунтов резанию: монография. Могилев : Изд-во БРУ, 2008. 179 с.

Информация об авторах

Кожевников Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры вагонного хозяйства и наземных транспортных комплексов. E-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru. Приволжский государственный университет путей сообщения. Россия, 443066, Самара, ул. Свободы, д. 2в.

Поступила 16.06.2025 г.

© Кожевников В.А., 2026

Kozhevnikov V.A.

Volga State University of Railway Transport

*E-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru

THEORETICAL MODELING AND CALCULATION OF THE EFFECTIVENESS OF USING A VAULT BREAKER IN A BUNKER

Abstract. This paper discusses important issues of modeling and optimizing the operation of arch crushers, devices designed to loosen caked material in bunkers, which is an urgent task in the mining, construction and processing industries. The relevance of the study is due to the need to increase the efficiency of unloading processes, as well as reduce energy costs and increase equipment productivity. Mathematical models based on the theory of cutting forces and the mechanics of bulk media were developed and analyzed in the work, which made it possible to form analytical expressions for the acting forces, moments and power spent on loosening the material. The article examines in detail the influence of design and operating parameters (length of working bodies, feed rate, angular rotation speed and cross-sectional dimensions) on the energy performance of the device and its efficiency. The power dependence on these parameters has been analyzed, and optimal ranges have been identified to minimize energy costs while maintaining high unloading efficiency. The physico-mechanical properties of materials such as density, friction and traceability are also taken into account, which expands the possibilities of practical adaptation of models to various operating conditions. The results obtained contribute to a more accurate design and increase the efficiency of arch breakers, as well as expand their prospects for use in various technological and production conditions.

Keywords: arch breaker, loosening of the material, hopper, arching, working body, structural and operational parameters, loosening.

REFERENCES

1. Tretyakov G.M., Prusov M.V., Denisov V.V., Kononov I.I. Experimental studies of bulk cargo storage in transport and technological complexes [Eksperimentnyye issledovaniya khranilishcha syuchikh грузов v transportno-tekhnologicheskikh kompleksakh]. Bulletin of Transport of the Volga region. 2020. No. 5 (83). Pp. 56–61. (rus)

2. Denisov V.V., Kononov I.I., Prusov M.V. Management of grain cargo loading, storage and unloading processes in transport and warehouse complexes [Upravleniye protsessami zagruzki,

khraneniya i vygruzki zernovykh грузов v transportno-skladskikh kompleksakh]. World of Transport. 2022. No. 20. Iss. 2 (99). Pp. 60–65. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-2-6. (rus)

3. Prusov M.V., Denisov V.V., Kononov I.I. Resource conservation in transport and warehouse complexes during the operation of bunker systems [Resursoberezheniye v transportno-skladskikh kompleksakh pri ekspluatatsii bunkernykh sistem]. Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2024. No. 7. Pp. 121–125. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-121-122. (rus)

4. Reddy Y.V., Venkatesh S. Flow characteristic evaluation of iron ore for design of bunkers and chutes with different liner materials. *Materials today: Proceedings*. 2023. Vol. 76. Iss. 1 Pp. 95–102. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.132.

5. Zhu J., Wang K., Ma Y., Xu W., Long J., Li X. Arch formation mechanism and discharge process of cohesive fine powder in a vibrated silo. *Particology: Science and Technology of Particles*. 2024. Vol. 94. Pp. 373–385. DOI: 10.1016/j.partic.2024.09.001.

6. Xue J., Schiano S., Zhong W., Chen L., Wu C.-Y. Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2019. Vol. 358. Pp. 55–61. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.08.063.

7. Matchett A.J. The shape of the cohesive arch in hoppers and silos – Some theoretical considerations. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2007. Vol. 171. Iss. 3. Pp. 133–145. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.10.010.

8. Alborzi S., Hashmi S.M. Low-friction soft particles add intermittency and avalanches to the flow of rigid particles in a hopper. *Powder Technology: An international journal on the science and technology of wet and dry particulate systems*. 2025. Vol. 459. 121000.

9. Kozhevnikov V.A., Astrakhansky A.Yu., Zhdanov A.G. Classification of arch-breaking means

of mechanization of unloading of heavy loads [Klassifikatsiya svodoobrushayushchikh sredstv mekhanizatsii vygruzki trudnosypuchikh gruzov]. *Mechanics, automation and robotics*. 2020. No. 5. Pp. 56–58. DOI: 10.26160/2541-8637-2020-5-56-58.

10. Tretyakov G.M. Portable arch cleaner. Patent RF, no. 2190486, 2002.

11. Tretyakov G.M., Dudkin E.P., Goryushinsky V.S., Goryushinsky I.V., Goryushinskaya E.V. Arch-breaker cleaner. Patent RF, no. 2191078, 2002.

12. Tretyakov G.M., Goryushinsky V.S., Goryushinsky I.V., Shur V.L., Kozhevnikov V.A. Portable arch cleaner. Patent RF, no. 2201813, 2003.

13. Yemelyanov S.G., Shvets S.V., Remnev A.I., Sergeev S.A., Pavlov E.V., Remneva L.A. Theory of cutting: mathematical modeling and system analysis: monograph [Teoriya rezaniya: matematicheskoye modelirovaniye i sistemnyy analiz : monografiya]. Stary Oskol: Thin High-tech Technologies LLC, 2020. 312 p. (rus)

14. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Maslov A.R. Highly efficient processing technologies: monograph [Vysokoeffektivnyye tekhnologii obrabotki : monografiya]. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 455 p. (rus)

15. Berestov E.I., Smolyar A.P. Soil resistance to cutting: monograph [Soprotivleniye gruntov rezaniyu : monografiya]. Mogilev: BRU Publishing House, 2008. 179 p. (rus)

Information about the authors

Kozhevnikov, Vadim A. PhD. E-mail: v_a_kozhevnikov@bk.ru. Volga State University of Railway Transport. Russia, 443066, Samara, st. Svobody, 2b.

Received 16.06.2025

Для цитирования:

Кожевников В.А. Теоретическое моделирование и расчет эффективности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 84–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-84-92

For citation:

Kozhevnikov V.A. Theoretical modeling and calculation of the effectiveness of using a vault breaker in a bunker. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 2. Pp. 84–92. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-84-92

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-93-104

***Чепуров М.С., Санин С.Н., Баранов Д.С.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: avtpost@mail.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КОРПУСОВ ЖЕСТЯНОЙ ТАРЫ

Аннотация. В статье приведено краткое описание технологического процесса изготовления жестяных корпусов изделий на автоматической вальцовочно-сварочной машине. Обозначена проблема предприятия, заключающаяся в модернизации зарубежного сварочного оборудования, определен ряд задач, решение которых позволит усовершенствовать систему управления машины путем внедрения современных программируемых логических контроллеров.

В ходе исследований был подробно изучен процесс изготовления типового изделия – обечайки (корпуса) жестяной тары, определены основные рабочие зоны вальцовочно-сварочной машины и разработана циклограмма работы ее приводов. На основании этих данных был принят ряд условий и ограничений, направленных на повышение стабильности процесса и минимизацию возможных потерь машинного времени. Для реализации процесса с учетом всех ограничений и требований был сформирован перечень необходимых датчиков и определено их положение в автомате. Разработана временная диаграмма прохождения заготовки через узел сварки, позволяющая точно настроить работу заданных приводов и датчиков, определяющую производительность процесса сварки и качество получаемого изделия.

Разработаны программы управления сварочной машиной, включая непосредственно процесс сварки, а также интерфейс панели оператора системы управления, позволяющие провести ряд экспериментов по определению оптимальных режимов сварки.

Ключевые слова: сварочная машина, модернизация системы управления, программируемый логический контроллер (ПЛК), шовная роликовая сварка.

Введение. Для фасовки лакокрасочной продукции наиболее широкое применение нашла жестяная тара [1]. Ежегодно требуются миллиарды единиц различной тары. Задачу производства жестяной тары решают

специальные предприятия или, непосредственно, производители продукции. Процесс изготовления жестяной тары выполняется на автоматических линиях [2, 3], одна из которых представлена на фото (рис. 1).



Рис. 1. Автоматическая линия изготовления жестяных ведер

Краткое описание процесса: в автоматическую линию поступают заготовки в виде жестяных листов прямоугольной формы в соответствии с размерами будущего изделия, на которые при необходимости наносятся цветные изображения с указанием содержимого тары, при этом края заготовок подвергаются зачистке [4]

под сварку. С помощью вальцовки заготовке придают форму кольцевой обечайки (рис. 2), края которой впоследствии соединяют между собой с помощью сварки. В дальнейшем к полученной обечайке прикрепляется дно, привариваются ушки и устанавливается ручка, а на открытой части полученной тары

формируется валик, придающий конструкции тары определенную жёсткость и обеспечивая безопасность эксплуатации. В процессе перемещения изделия по автоматической линии выполняется контроль качества сварки и прочих соединений – происходит оценка прочности и отсутствия дефектов (трещин, непроваров), что

важно для герметичности тары. Впоследствии наносится защитное покрытие на шов в виде лака, производится сушка, выполняется общий контроль качества (проверка на герметичность, точность размеров, качество покрытия) и упаковка.

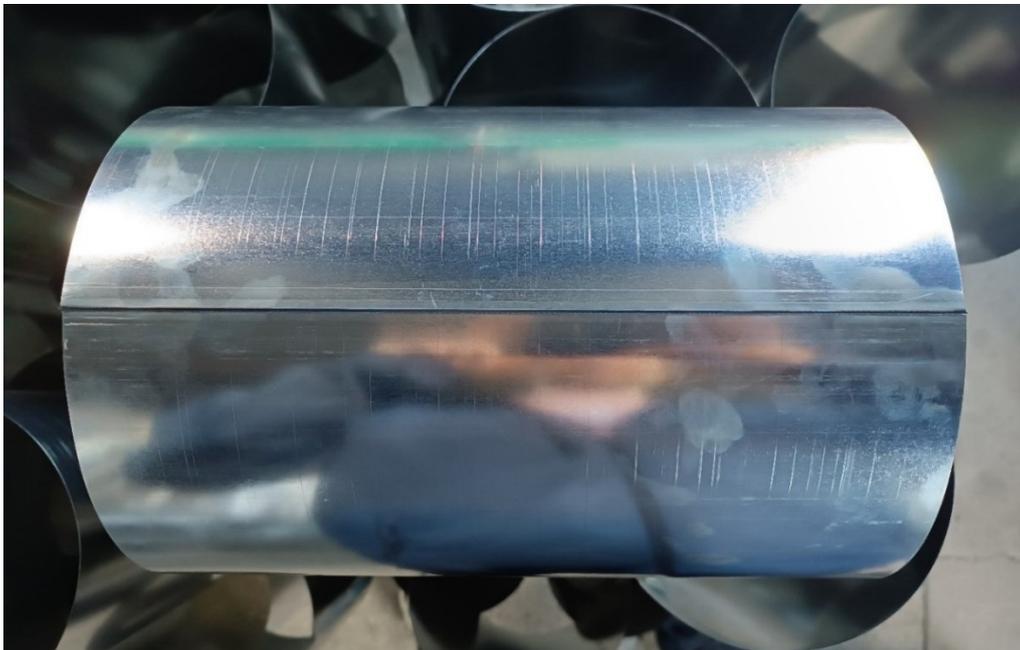


Рис. 2. Обечайка (корпус)

Основной операцией производственного процесса является вальцовка [5] и сварка [6–9] корпуса изделия, выполняемая специальным автоматом, состоящим из вальцовочно-сварочной машины [10] и листоподатчика. Такое разделение не случайно, так как указанные устройства автономны и различны по конструкции, зависящей от конкретных производителей. Производительность листоподатчика определяется производительностью вальцовочно-сварочной машины.

Объектом исследования является вальцовочно-сварочная машина. В Российской Федерации эксплуатируется большое количество подобных автоматов зарубежного производства, и в случае износа такой машины или выхода ее из строя, предприятие вынуждено тратить значительные средства на ремонт, модернизацию или приобретение новой.

В настоящее время модернизация таких машин с незначительным механическим износом узлов может заключаться в замене системы управления на более современную и эффективную [11].

Целью исследования является повышение производительности процесса изготовления жестяной тары за счет сокращения

вспомогательного и подготовительно-заключительного времени. Для выполнения процесса модернизации управления вальцовочно-сварочной машины необходимо решить следующие задачи:

- Детерминировать основные процессы, реализуемые машиной;
- Построить алгоритм работы машины с учётом современного состояния аппаратного обеспечения и комплектующих системы управления;
- Подобрать комплектующие системы управления и разработать управляющую программу.

Первостепенной является задача детерминирования, остальные задачи взаимосвязаны и решаются совместно.

Оборудование. Рассмотрим работу вальцовочно-сварочной машины (рис. 3).

Из листоподатчика заготовка 1 поступает в узел вальцовки, где вальцуется обечайка (корпус) изделия. После окончания вальцовки обечайка выводится из узла вальцовки упорами 2 цепного конвейера [12], при этом цепь перемещается на величину шага, равного расстоянию между соседними упорами 2 в направлении зоны сварки. По достижении обечайкой сварочных роликов (электродов) [13]

3 и 4 сварочного узла контактной сварки, включается пневматический привод 5, сводящий сварочные ролики между собой, благодаря чему происходит сжатие свариваемых внахлест кромок обечайки, движущихся между сварочными роликами, одновременно с тем на сварочные ролики подается напряжение.

Обечайка выходит из зоны действия цепного транспортера и подается вдоль зоны сварки самими сварочными роликами. По окончании процесса сварки пневмопривод отключается, подача сварочного тока прекращается и готовая обечайка перехватывается выходным транспортером.



Рис. 3. Вальцовочно-сварочная машина

Авторы описывают оборудование, в котором перемещение заготовки в узел сварки выполняется цепным конвейером. Однако существуют конструкции машин, в которых перемещение обечайки производится за счет пневмопривода или электропривода с кривошипно-ползунным механизмом, выходные звенья которых совершают возвратно-поступательные движения и перемещают обечайку из зоны вальцовки сразу в зону сварки. Хотя такой способ кажется значительно проще, он не позволяет регулировать скорость перемещения заготовки в требуемом диапазоне, к тому же за счет выполнения возврата штока в исходное положение увеличивается общее время цикла. Перемещение заготовок цепным конвейером не имеет возвратных движений, привод позволяет регулировать скорость в достаточно широком диапазоне, наличие не одного, а нескольких шагов перемещения заготовки от узла вальцовки к узлу сварки позволяет создать, своего рода, накопитель свальцованных заготовок. В случае пропуска подачи листов возможно увеличение скорости подачи заготовок с помощью регулируемого привода, что способствует минимизации потерь времени.

При более подробном рассмотрении работы цепного конвейера и узла сварки выявляется следующая зависимость: неважно, какая скорость цепи конвейера устанавливается, в момент сварки она становится равной скорости вращения дисковых электродов. Одним из

преимуществ цепного конвейера подачи заготовок является возможность контролировать момент вала двигателя. Внезапное увеличение момента свидетельствует о наличии затора, по этому сигналу можно незамедлительно остановить оборудование во избежание аварии и устранить неполадку.

В процессе сварки контакт роликов между собой и непосредственно с заготовкой недопустим, т.к. это ведет к ряду неизбежных дефектов и неисправностей: перегреву, повышенному износу и прогоранию заготовки, а в худшем случае – выходу оборудования из строя, поэтому по роликам пропускается предварительно профилированная (плоская) медная проволока, которая служит промежуточным контактным элементом [14, 15]. Проволока используется однократно и после прохождения по электродам она отправляется на измельчение (рубку) для дальнейшей переработки. Из этого следует, что узел подачи проволоки должен изменять профиль проволоки с круглого на плоский, следить за целостностью проволоки и преобразовывать ее в лом. К тому же он должен сам обеспечивать натяжение проволоки, например, с помощью бесштоковых пневмоцилиндров [16].

В процессе сварки происходит значительный нагрев узлов оборудования: тиристорного контактора, сварочного трансформатора, элементов сварочного контура (шин) и внутренних полостей верхней электродной головки и нижнего электродного

устройства [17], в связи с этим необходимо дополнительное их охлаждение с помощью жидкого теплоносителя, т.к. работа узла контактной сварки без подачи охлаждающей жидкости недопустима.

Выделим три основные рабочие зоны вальцовочно-сварочной машины, располагающиеся последовательно: 1 – вальцовка, 2 – перемещение, 3 – сварка. Дополнительная зона 4 включает: профилирование, подачу, натяжение и утилизацию проволоки. Связь зон 3 и 4

осуществляется приводным роликом, одновременно являющимся сварочным электродом.

Анализ циклограммы (Табл. 1) показывает, что вальцы (вальцовочный узел) постоянно находятся в работе – это является предпочтительным, т.к. при их включении и выключении затрачивается время на разгон и остановку, что в свою очередь увеличивает длительность цикла и негативно влияет на производительность процесса в целом.

Таблица 1

Циклограмма работы вальцовочно-сварочной машины

Операция Оборудование	Вальцовка	Перемещение	Сварка
Привод вальцов			
Привод конвейера			
Привод ролика			
Муфта привода ролика			
Цилиндр прижима электрода			
Привод профилирования			
Привод рубки			
Время такта	T1	T2	T3

Приводы, активность которых определяется операцией, отмечены зеленым. Золотым отмечены приводы, активность которых зависит только от сигнала датчиков.

Привод роликов постоянно находится во включенном состоянии, момент от него передаётся муфтой, включаемой во время сварки (рис. 4).



Рис. 4. Привод роликов

Приводы профилирования и рубки могут быть включены при необходимости, что определяется наличием проволоки в накопителе (рис. 5).

Свальцованная заготовка поступает в узел сварки, в котором выполняется соединение двух краёв барабана 1 с помощью неподвижного 2 и

прижимного 4 роликов, между которыми пропущена медная проволока 3. Прижим осуществляется с помощью пневмоцилиндра 7, шток которого воздействует на держатель 5 прижимного ролика 4, усилие прижима можно регулировать с помощью пружинного механизма 6 (рис. 6).



Рис. 5. Накопитель проволоки

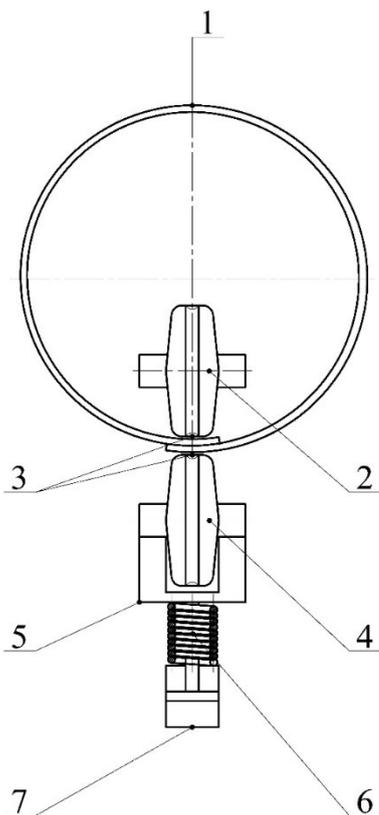


Рис. 6. Схема сварки заготовки барабана

Анализ оборудования показывает, что для реализации технологии получения сварного барабана из листового материала требуется наладка следующих узлов: податчика листовых заготовок, узла вальцовки обечаяек, узла перемещения заготовок, узла сварки заготовок, узла профилирования и подачи проволоки. Последовательная и синхронная работа этих узлов обеспечивает реализацию процесса получения обечайки.

Методы. Метод получения обечаяек из листового материала лишь частично затронут при описании оборудования, в связи с этим требуются уточнения. Поскольку реализуется синхронно-последовательная схема, то очевидным становятся запреты на выполнение текущей операции, если не подготовлена последующая, например, при отсутствии сигнала

о рабочем состоянии вальцов подача заготовок листоподачиком недопустима, при отсутствии сигнала о рабочем состоянии профилирования и подачи проволоки процесс сварки недопустим. Игнорирование этих ограничений неизбежно приведет к повреждению заготовок, образованию заторов, обрыву сварочной проволоки, а в отдельных случаях к выходу из строя оборудования и несчастным случаям.

Если взаимные запреты можно реализовать просто подачей на соответствующий узел разрешающего сигнала от синхронного узла, то последовательная реализация процесса получения обечайки требует использования в оборудовании датчиков сигналов или состояний.

Подача листовой заготовки в узел вальцовки возможна только в том случае, если цепной конвейер находится в положении, исключающем соударение вальцуемой листовой заготовки с упором транспортера (рис. 7).

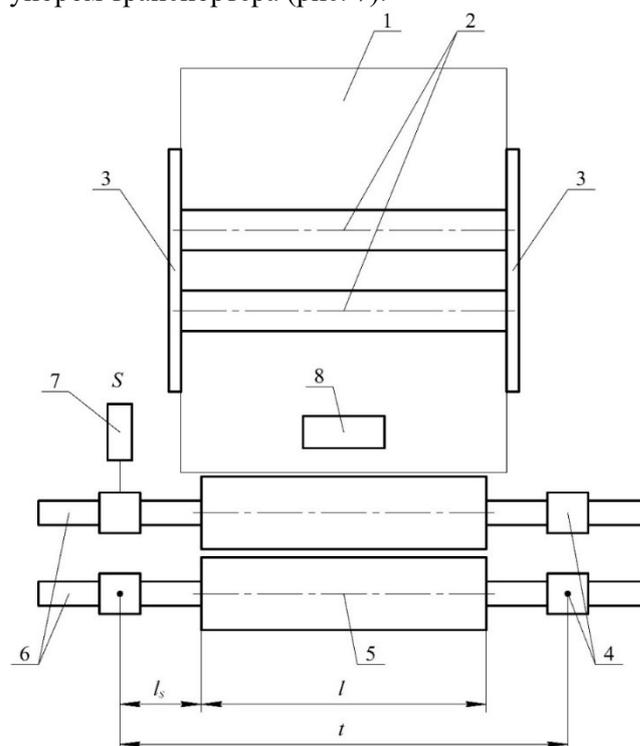


Рис. 7. Схема подачи заготовки в узел вальцовки

Согласно схеме, подача листа 1 валками листоподачика 2 [18] по направляющим 3 возможна только в том случае, если упор 4, закреплённый на цепном конвейере 6, находится в начальном положении S , определяемом конечным выключателем 7. Расстояние от торца вальцов 5 до датчика 7 можно определить по формуле:

$$l_S = \frac{t-l}{2} \quad (1)$$

где l , мм – длина вала вальцов; t , мм – расстояние между соседними упорами 4 в продольном направлении. Отклонение положения датчика 7, превышающее расчетное расстояние l_S неизбежно приведет к последствиям, описанным ранее.

Цепь конвейера совершает как медленные, так и быстрые перемещения, например, подвод цепи в начальное положение выполняется на максимальной скорости, что исключает точное позиционирование упора ввиду возникающих сил инерции, в связи с этим необходимо обеспечить торможение цепи перед профилированием при минимальном времени цикла получения изделия.

Решение задачи торможения при помощи дополнительного конечного переключателя неэффективно, т.к. требуется его механическая настройка. Предпочтительным является использование энкодера [19, 20], в этом случае возможно подобрать положение упора, при котором включается торможение.

Для контроля наличия листа необходим дополнительный конечный выключатель 8, определяющий прохождение листа через вальцы 5 и дающий команду на включение перемещения цепи, а также позволяющий вести учет поступающих на вальцовку листов и свальцованных заготовок. Используются передний и задний фронты импульса, формируемые этим датчиком. Авторы использовали фотоэлектрический датчик, состоящий из источника света и приёмника [21].

Наиболее важной является зона сварки (рис. 8). Заготовка 1 подаётся в сварочный узел упором цепного конвейера 6, при этом заготовка проходит направляющую (мундштук) 5, в которой формируется необходимый нахлест её краёв. Дальнейшее перемещение заготовки выполняется роликами 3 и 4, один из которых является ведущим и вращается с заданной скоростью – v_p , м/мин. Для исключения деформации заднего края движущейся заготовки, её скорость – v_3 , м/мин не должна превышать скорость вращения роликов, из этого следует, что:

$$v_3 < \frac{\pi \cdot d_p \cdot n_p}{1000} \quad (2)$$

где, d_p , мм и n_p , об/мин – диаметр и частота вращения ролика соответственно. Ролики 3 и 4 являются электродами контактной сварки. Во время прохождения заготовки между роликами на них подаётся напряжение сварки, и через заготовку протекает сварочный ток, величина которого зависит от толщины свариваемого металла [22]. Команда на включение и выключение приводного сварочного ролика и подачу сварочного напряжения формируется датчиком 2, определяющим наличие заготовки в зоне сварки.

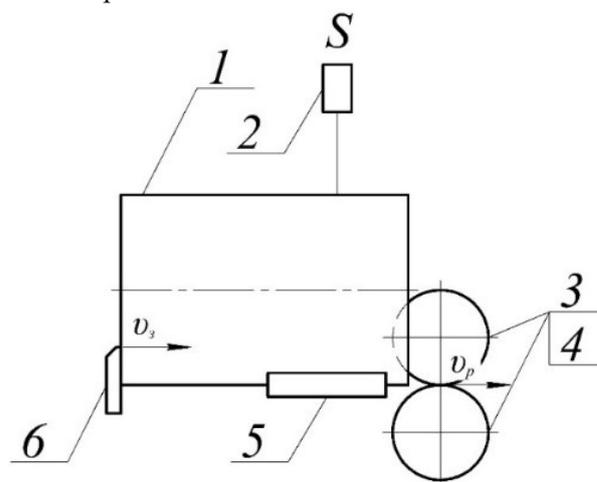


Рис. 8. Схема прохождения заготовки через узел сварки

При перемещении заготовки 1, её передний край достигает датчика 2, который управляет процессом сварки (рис. 9, а). В течение времени τ_1 включается приводной ролик 3, и заготовка перемещается со скоростью v_p (рис. 9, б). По прошествии времени τ_1 подводится прижимной ролик 4, обеспечивая, тем самым прочность соединения, на сварочные электроды и проволоку подаётся напряжение, через заготовку начинает проходить сварочный ток. При выходе заднего края заготовки за пределы плоскости S (рис. 9, в), через определенное время подача напряжения на электроды должна прекратиться, при этом задняя кромка заготовки окажется в плоскости W . Так как скорость заготовки не изменяется, то подача тока должна прекращаться не позднее момента прохождения заготовки через ось роликов (рис. 9, г).

На временной диаграмме (Рис. 10), приближенной к реальным условиям, за начало отсчета принимаем точку S , то есть момент прохождения передней кромки заготовки датчика 2 (рис. 9, а), при этом за время τ_1 должен включиться приводной ролик. Напряжение на сварочные электроды подаётся в момент времени τ_3 , но этот момент времени может быть сдвинут

на величину τ_2 и τ_4 , если требуется не проваривать часть шва. Конец процесса сварки определяется в точке E (рис. 10), но не позднее прохождения задней кромки заготовки плоскости W (Рис. 9, г). Вращение приводного

ролика прекращается через время τ_5 . Необходимым условием является прекращение подачи тока не позднее выхода заготовки за пределы плоскости W .

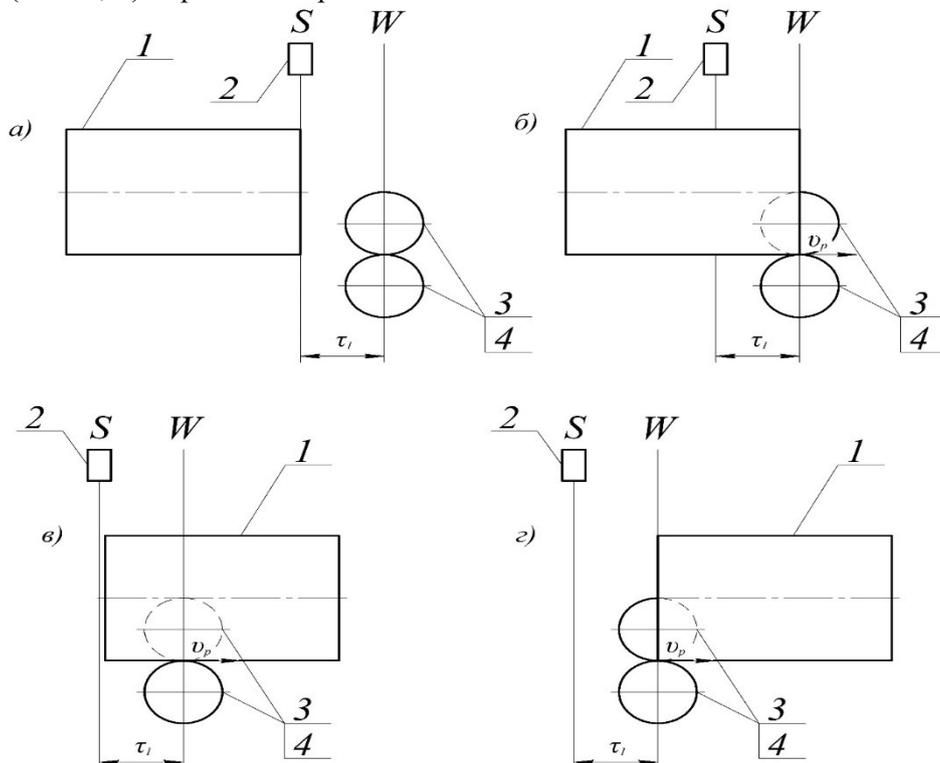


Рис. 9. Схема прохождения заготовки барабана через зону сварки

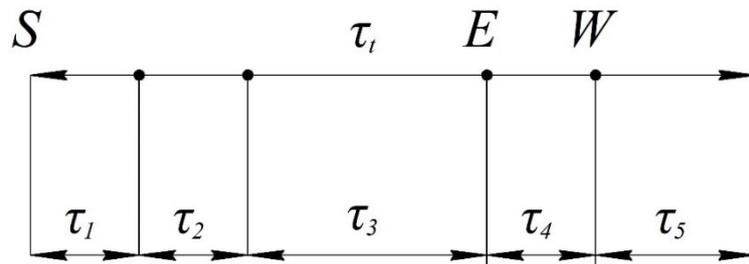


Рис. 10. Временная диаграмма прохождения заготовки через узел сварки

Результаты. С помощью датчика 2 (Рис. 9) можно точно определить положение передней и задней кромки заготовки, положение остальных точек заготовки – только косвенно, а именно по времени, прошедшем от пересечения заготовкой датчика. Наличие энкодера позволяет вычислить позицию каждой точки конкретно в единицах длины, т.е. то, что вычислялось из условий:

$$l_{\text{тек}} = v_p \cdot \tau_{\text{тек}} \quad (3)$$

$$\tau_{\text{тек}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_n \quad (4)$$

где $\tau_{\text{тек}}$, сек – текущее время движения заготовки; τ_n , сек – время прохождения n -го участка заготовкой. В случае использования дополнительного энкодера на приводе подающего ролика для определения текущей позиции возможно более точное позиционирование.

Определено количество приводов вальцовочно-сварочной машины:

Привод вальцов можно использовать нерегулируемый, т.к. в процессе работы скорость вальцов не изменяется;

Привод ролика регулируемый, причем следует исключить влияние разгона и торможения на процесс сварки, как вариант, привод включен постоянно, а ролик подключается с помощью муфты;

Привод профилирования проволоки регулируемый, причем его скорость связана со скоростью сварочного ролика;

Привод цепи только регулируемый, причины указаны выше;

Привод рубки проволоки регулируемый.

Определен перечень основных датчиков, необходимых для реализации управления процессом получения обечайки (табл. 2).

Таблица 2

Перечень датчиков системы управления

№ п/п	Наименование датчика	Функции датчика
1.	Датчик загрузки	Определение позиции загрузки листа
2.	Фотоэлектрический датчик листа	Определение поступления листа в вальцы, определение свальцованного листа
3.	Энкодер на приводе цепи конвейера	Определение положения цепи для точного позиционирования упора
4.	Датчик начала и окончания сварки	Запуск процесса и окончание процесса сварки
5.	Датчик заклинивания цепи	Определение затора при транспортировке заготовок к узлу сварки
6.	Датчик прижима ролика	Определение установленного прижима сварочного ролика
7.	Датчик проволоки	Определение наличия проволоки по её натяжению
8.	Датчик включения профилирования и подачи проволоки	Включение подачи проволоки и её профилирование
9.	Датчик выключения подачи проволоки	Определение наличия проволоки в накопителе и выключение её подачи
10.	Датчик включения рубки проволоки	Определение необходимости удаления проволоки из накопителя
11.	Датчик выключения рубки проволоки	Отключение рубки проволоки
12.	Датчик обрыва проволоки	Датчик определения обрыва проволоки, по которому отключается её подача и привод сварочного ролика
13.	Датчик наличия давления воздуха в системе	Блокировка работы машины при отсутствии в системе воздуха, который используется в процессе подачи и накопления проволоки, а также в приводе сварочного ролика и узле подачи листов
14.	Датчик потока	Определение наличия потока охлаждающей жидкости и блокировка работы машины при его отсутствии
15.	Датчик тока	Определение величины тока сварки, отключение подачи напряжения при превышении допустимого значения

Следует отметить, что использование датчика 15 не обязательно при выполнении наладки, чего нельзя сказать об автоматическом режиме.

Представлен фрагмент программы для ПЛК на языке LD, реализующий включение и выключение напряжения на сварочных электродах (рис. 11).

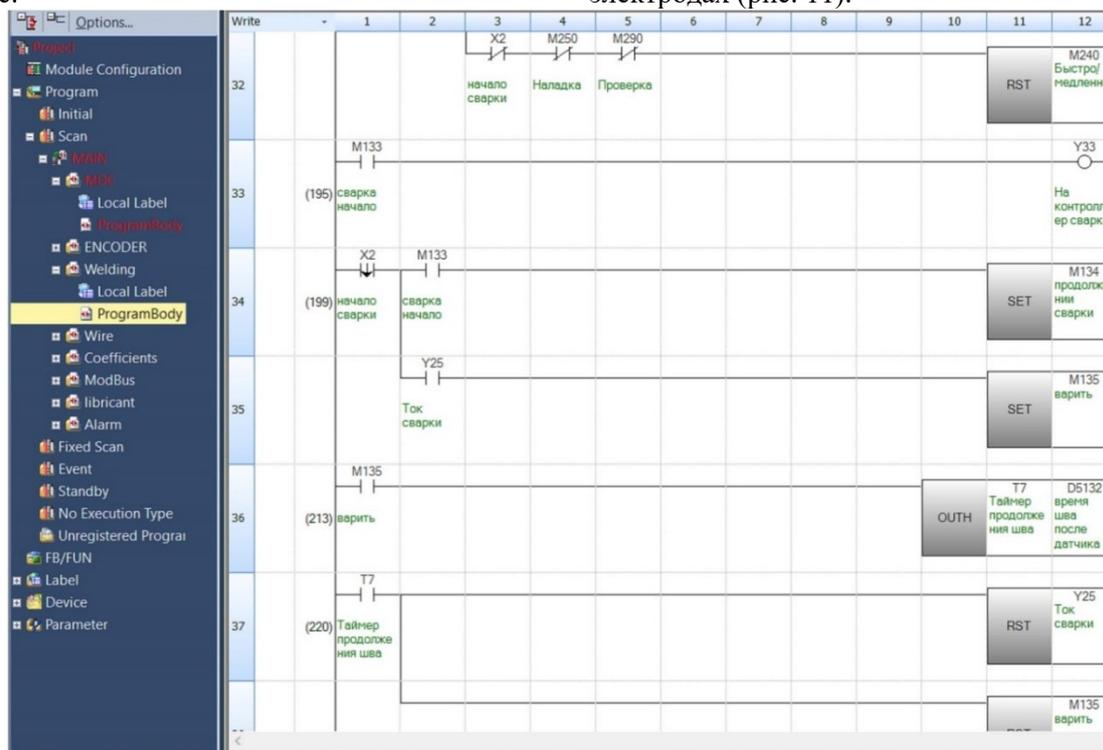


Рис. 11. Фрагмент программы управления процессом сварки на языке LD

Без предварительного структурного анализа невозможно разработать интерфейс панели оператора системы управления машиной (рис.

12). Алгоритм управления машиной и процессом сварки будет изложен в других публикациях.



Рис. 12. Интерфейс управления вальцовочно-сварочной машиной (Экран "Работа")

Выводы. Описанный выше предварительный анализ структуры автоматической вальцовочно-сварочной машины для изготовления тонкостенных барабанов, позволил авторам провести серию опытов по поиску сварочных режимов с полной заменой системы управления на современную с использованием промышленного логического контроллера, в том числе и для управления процессом сварки.

Опыты, проведённые авторами, позволили точно идентифицировать заготовку по времени, при этом задавалось опорное время таймеров позиционирования: время пропуска шва в начале, время пропуска шва в конце, время вывода заготовки из зоны сварки. Это опорное время назначалось для скорости проволоки 10 м/мин, а затем при изменении этой скорости корректировались значения таймеров, что является достаточным основанием в отказе использования дополнительного энкодера в приводе ролика.

Источник финансирования. Исследование выполнено 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. Производство жестяной тары // Жестеупаковка [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.zhestepack.ru/production.html> (дата обращения: 13.05.2025).

2. Автоматическая линия для производства жестяной тары // JORSON [Электронный ресурс]. URL: <http://metalpackaging.ru/1-10-1-40-50spm-automatic-tinplate-pail-and-bucket-production-line.html> (дата обращения: 13.05.2025).

3. Индивидуальные решения для производства металлической тары // STWMF [Электронный ресурс]. URL: <http://canbodymakingline.ru/customized-canbody-production-lines-solutions.html> (дата обращения: 13.05.2025).

4. Чепчуров М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е., Баранов Д.С., Санин С.Н. Автоматическое управление зачистными модулями машины для механической обработки кромок листовых заготовок // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №. 1. С. 12–20. DOI: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20

5. Вальцовка // САЙВЕРХОТ [Электронный ресурс]. URL: <https://saverhot.ru/baza-znaniy/azbuka-trub-ppu/valtsovka/> (дата обращения: 13.05.2025).

6. Шовная (роликовая) сварка // РУДЕТРАНС [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rudetrans.ru/o-svarke/shovnaya-rolikovaya-svarka/> (дата обращения: 13.05.2025).

7. Чулошников П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М: Машиностроение, 1974. 232 с.

8. Гуляев И.А. Технология точечной и рельефной сварки (в массовом производстве). М.: Машиностроение, 1978. 246 с.

9. Кабанов Н.С. Сварка на контактных машинах. М.: Высшая школа, 1973. 255 с.

10. Автоматические корпусообразующие машины (сварные) // NEW DODO [Электронный ресурс]. URL: <http://canproductionline.ru/2-1-automatic-canbody-welder.html> (дата обращения: 13.05.2025).

11. Рафиков И. А., Ямалетдинов Р. К. Теория и практика в модернизации многоточечных электроконтактных сварочных машин // Технологии реновации машин и оборудования. Уфа: Башкирский государственный аграрный университет. 2016. С. 247–254.

12. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение, 1980. 301 с.

13. Слиозберг С.К., Чулошников П.Л. Электроды для контактной сварки. Л.: Машиностроение, 1972. 96 с.

14. Сварочная проволока: виды и применение // FoxWeld [Электронный ресурс]. URL: <https://foxweld.ru/company/articles/svarochnaya-provoloka-vidy-i-primeneniye/> (дата обращения: 13.05.2025).

15. Сварочная проволока: виды и применение // МЕТАЛЛИНВЕСТ [Электронный ресурс]. URL: [https://m-investspb.ru/poleznaya-](https://m-investspb.ru/poleznaya-informatsiya/vidy-i-primeneniye-svarochnoy-provoloki/)

[informatsiya/vidy-svarochnoy-provoloki](https://m-investspb.ru/poleznaya-informatsiya/vidy-svarochnoy-provoloki/) (дата обращения: 13.05.2025).

16. БЕСШТОКОВЫЕ ПНЕВМОЦИЛИНДРЫ // КРИОЛА URL: <https://pneumaticpro.by/pnevmonsilindry/besshtokovyepnevmonsilindry/> (дата обращения: 13.05.2025).

17. Чулошников П.Л. Контактная сварка. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.

18. Вальцы листогибочные // IB GROUP [Электронный ресурс]. URL: <https://ib-gr.ru/categories.php?id=48> (дата обращения: 13.05.2025).

19. Энкодеры // КТС [Электронный ресурс]. URL: <https://krmts.ru/encoders.html> (дата обращения: 13.05.2025).

20. Ключиков А.В., Куприн М.С. Имитационные модули энкодеров и электрических двигателей при проектировании робототехнических систем // Робототехника и техническая кибернетика. 2025. Т. 13, № 1. С. 50–56.

21. Принципы работы фотоэлектрических датчиков, виды, особенности // Sensoren [Электронный ресурс]. URL: https://sensoren.ru/news/printsipy_raboty_fotoelektricheskikh_datchikov_vidy_osobennosti/ (дата обращения: 13.05.2025).

22. Кочергин К.А. Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.

Информация об авторах:

Чепчуров Михаил Сергеевич, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: avtpost@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Санин Сергей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: osup-sns@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 24.05.2025 г.

© Чепчуров М.С., Санин С.Н., Баранов Д.С., 2026

***Chepchurov M.S., Sanin S.N., Baranov D.S.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

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

MODERNIZATION OF AUTOMATIC MACHINE FOR PRODUCING TIN CONTAINER CASES

Abstract. The article provides a brief description of the technological process for manufacturing tin body products on an automatic rolling and welding machine. The enterprise's problem of upgrading foreign welding

equipment is identified, a number of tasks are defined, the solution of which will improve the machine control system by introducing modern programmable logic controllers.

During the research, the manufacturing process of a typical product - a shell (body) of a tin container - was studied in detail, the main working areas of the rolling and welding machine were determined, and a cyclogram of its drives was developed. Based on these data, a number of conditions and restrictions were adopted aimed at increasing the stability of the process and minimizing possible losses of machine time. To implement the process taking into account all the restrictions and requirements, a list of necessary sensors was formed and their position in the machine was determined. A time diagram of the passage of the workpiece through the welding unit was developed, allowing for precise adjustment of the operation of the specified drives and sensors, determining the productivity of the welding process and the quality of the resulting product. Programs have been developed to control the welding machine, including the welding process itself, as well as the interface of the control system operator panel, allowing a series of experiments to be carried out to determine the optimal welding modes.

Keywords: welding machine, control system upgrade, programmable logic controller (PLC), seam roller welding

REFERENCES

1. Production of tin containers. Tin packaging. [Proizvodstvo zhestyanoj tary. ZHesteupakovka]. URL: <https://www.zhestepack.ru/production.html> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
2. Automatic line for the production of tin containers. JORSON. [Avtomaticheskaya liniya dlya proizvodstva zhestyanoj tary. JORSON]. URL: <http://metalpackaging.ru/1-10-1-40-50cpm-automatic-tinplate-pail-and-bucket-production-line.html> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
3. Customized solutions for metal container production. STWMF. [Individual'nye resheniya dlya proizvodstva metallicheskoy tary. STWMF]. URL: <http://canbodymakingline.ru/customized-canbody-production-lines-solutions.html> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
4. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Baranov D.S., Sanin S.N. Automatic control of cleaning modules of a machine for mechanical processing of edges of sheet blanks [Avtomaticheskoe upravlenie zachistnymi modul'yami mashiny dlya mekhanicheskoy obrabotki kromok listovyh zagotovok]. Automation and modeling in design and management. 2025. No. 1. Pp. 12–20. DOI: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20 (rus)
5. Rolling. SAVERHOT. [Val'covka. SAJVERHOT]. URL: <https://saverhot.ru/baza-znaniy/azbuka-trub-ppu/valtsovka/> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
6. Seam (roller) welding. RUDETRANS. [Shovnaya (rolikovaya) svarka. RUDETRANS]. URL: <https://www.rudetrans.ru/o-svarke/shovnaya-rolikovaya-svarka/> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
7. Chuloshnikov P.L. Spot and roller electric welding of alloy steels and alloys. [Tochehnaya i rolikovaya elektrosvarka legirovannyh stalej i splavov]. Moscow: Mechanical Engineering, 1974. 232 p. (rus)
8. Gulyaev I.A. Technology of spot and projection welding (in mass production). [Tekhnologiya tochechnoj i rel'efnoj svarki (v massovom proizvodstve)]. Moscow: Mechanical engineering, 1978. 246 p. (rus)
9. Kabanov N.S. Welding on contact machines. [Svarka na kontaktnyh mashinah.]. Moscow: Graduate School, 1973. 255 p. (rus)
10. Automatic body forming machines (welding). NEW DODO [Avtomaticheskie korpusoobrazuyushchie mashiny (svarnye). NEW DODO]. URL: <http://canproductionline.ru/2-1-automatic-canbody-welder.html> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
11. Rafikov I.A., Yamaletdinov R.K. Theory and practice in the modernization of multi-spot electric contact welding machines. Technologies for the renovation of machines and equipment [Teoriya i praktika v modernizacii mnogotochechnyh elektrokontaktnyh svarochnyh mashin. Tekhnologii renovacii mashin i oborudovaniya.]. Ufa: Bashkir State Agrarian University. 2016. Pp. 247–254. (rus)
12. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L. N. Continuous transport machines. [Mashiny nepreryvnogo transporta]. Moscow: Mechanical Engineering, 1980. 301 p. (rus)
13. Sliozberg S.K., Chuloshnikov P.L. Electrodes for contact welding. [Elektrody dlya kontaktnoj svarki]. Leningrad: Mashinostroenie, 1972. 96 p. (rus)
14. Welding wire: types and applications. FoxWeld. [Svarochnaya provoloka: vidy i primeneniye. FoxWeld]. URL: <https://foxweld.ru/company/articles/svarochnaya-provoloka-vidy-i-primeneniye/> (date accessed: 13.05.2025). (rus)
15. Welding wire: types and applications. METALLINVEST. [Svarochnaya provoloka: vidy i primeneniye. METALLINVEST]. URL: <https://m-investspb.ru/poleznaya-informatsiya/vidy-svarochnoy-provoloki> (date accessed: 13.05.2025). (rus)

16. RODLESS PNEUMATIC CYLINDERS. CRIOLA. [BESSHTOKOVYE PNEVMOCILINDRY. KRIOLA]. URL: <https://pneumaticpro.by/pnevmonsilindry/besshtokovyepnevmonsilindry/> (date accessed: 13.05.2025). (rus)

17. Chuloshnikov P.L. Contact welding. [Kontaktная svarka]. Moscow: Mechanical Engineering, 1987. 176 p. (rus)

18. Sheet metal bending rolls. IB GROUP. [Val'cy listogibochnye. IB GROUP]. URL: <https://ib-gr.ru/categories.php?id=48> (date accessed: 13.05.2025). (rus)

19. Encoders. KTS. [Enkodery. KTS]. URL: <https://krmts.ru/encoders.html> (date accessed: 13.05.2025). (rus)

20. Klyuchikov A.V., Kuprin M.S. Simulation modules of encoders and electric motors in the

design of robotic systems. Robotics and technical cybernetics. [Imitacionnye moduli enkoderov i elektricheskikh dvigatelej pri proektirovanii robototekhnicheskikh sistem. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika.]. 2025. Vol. 13, No. 1. P. 50-56.

21. Principles of operation of photoelectric sensors, types, features. Sensoren. [Principy raboty fotoelektricheskikh datchikov, vidy, osobennosti. Sensoren]. URL: https://sensoren.ru/news/printsipy_raboty_fotoelektricheskikh_datchikov_vidy_osobennosti/ (date accessed: 13.05.2025). (rus)

22. Kochergin K.A. Contact welding. [Kontaktная svarka]. Leningrad.: Mechanical Engineering, 1987. 240 p. (rus)

Information about the authors

Chepchurov, Mikhail S, DSc. E-mail: avtpost@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Sanin, Sergey N, PhD. E-mail: sns@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Baranov, Denis S, Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 24.05.2025

Для цитирования:

Чепчуров М.С., Санин С.Н., Баранов Д.С. Модернизация автоматической машины по производству корпусов жестяной тары // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 93–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-93-104

For citation:

Chepchurov M.S., Sanin S.N., Baranov D.S. Modernization of automatic machine for producing tin container cases. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 93–104. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-93-104

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-105-113

Волков Д.И., *Воробьев П.С.*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева***E-mail: vorobps@gmail.com*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ИНСТРУМЕНТА ОТ ЖЕЛАЕМОЙ ТРАЕКТОРИИ В ПРОЦЕССЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ РОБОТА

Аннотация. В статье рассмотрены преимущества и недостатки использования промышленных роботов для управления инструментом в процессе механической обработки. Сделан вывод о том, что основным недостатком роботов является их низкая жесткость. Разработана математическая модель для расчета отклонения инструмента от желаемой траектории в процессе роботизированной механической обработки. Для прогнозирования отклонений в предложенной модели используется метод виртуальных пружин, обеспечивающий разумный компромисс между точностью моделирования и вычислительной сложностью. Модель реализована в Matlab с использованием пакета Robotics System Toolbox и URDF-описания промышленного робота. Она включает в себя учет внешних сил, моментов, а также динамических параметров, таких как скорость и ускорение, звеньев робота. Отклонения инструмента рассчитываются как в конфигурационном, так и в декартовом пространствах. Приведены результаты апробаций модели на тестовой траектории движения инструмента на примере промышленного робота ABB IRB 120. По результатам моделирования сделан вывод о существенном влиянии конфигурации робота на точность движения инструмента. Показано, что даже при отсутствии внешних нагрузок неудачный выбор конфигурации робота может вызывать значительные отклонения инструмента под действием силы тяжести. Разработанная модель может применяться как инструмент для повышения точности роботизированной обработки и оптимизации параметров производственного процесса.

Ключевые слова: промышленный робот, динамическая жесткость, метод виртуальных пружин, траектория движения, Matlab.

Введение. Роботизация является одной из основных тенденций современной промышленности. Промышленные роботы могут использоваться для выполнения большого количества различных задач, в частности, широкое распространение получили роботы для захвата, транспортировки и установки заготовок и деталей, сборки изделий и укладки готовой продукции. Роботизация не обошла стороной и сферу механической обработки. И хотя в ней задействованы лишь 1,4 % от общего числа промышленных роботов [1], роботизированная механическая обработка вызывает все больший интерес у современных исследователей.

Роботы, используемые в механической обработке, делятся на три категории в зависимости от выполняемых операций:

- роботы для захвата, перемещения и базирования заготовки – используются для точного позиционирования заготовки перед механической обработкой, выполняемой без непосредственного участия робота;

- роботы для захвата, перемещения и удержания заготовок – используются для удержания и управления заготовкой в процессе обработки;

- роботы для захвата и удержания инструмента – используются для удержания и управления режущим инструментом в процессе обработки.

Наибольший интерес для исследований и дальнейшего развития представляют роботы третьей категории. В настоящее время механическая обработка, как правило, выполняется при помощи металлорежущих станков с ЧПУ. Однако по сравнению с ними промышленные роботы обладают рядом преимуществ. Во-первых, промышленные роботы имеют большее рабочее пространство, что упрощает обработку крупногабаритных деталей [2]. Во-вторых, промышленные роботы обладают большей гибкостью, то есть могут выполнять больший спектр различных задач в постоянно меняющихся требованиях производства. В-третьих, эксплуатация промышленных роботов зачастую обходится дешевле, а их внедрение способствует снижению себестоимости механической обработки до 30 % [3].

Несмотря на описанные преимущества, широкое внедрение промышленных роботов в механическую обработку ограничено рядом их недостатков [4]. Одним из основных недостатков является сложность их программирования. В отличие от станков с ЧПУ, для которых существует

единый стандартизированный язык программирования, промышленные роботы используют собственные уникальные языки, определяемые производителями, что усложняет процесс их внедрения в производство, поскольку при этом требуется дополнительное обучение персонала. Однако главными недостатками промышленных роботов по сравнению со станками с ЧПУ являются их более низкая точность и недостаточная повторяемость операций: наибольшее распространение в механической обработке получили роботы с последовательной кинематической структурой, в которой каждое отдельное звено несет на себе вес всех последующих, что приводит к увеличению массы отдельных элементов конструкции и способствует большему отклонению инструмента от желаемой запрограммированной траектории, из-за чего снижается и точность обработки. Поэтому важной задачей является прогнозирование и компенсация отклонений инструмента от желаемой траектории в процессе механической обработки [5].

Описание модели. Для предварительной оценки отклонения инструмента в среде моделирования *Matlab* была разработана математическая модель в виде скрипта. Расчет отклонения инструмента состоит из нескольких этапов:

1. Инициализация параметров промышленного робота;
2. Импорт траектории движения инструмента и инициализация параметров процесса обработки;
3. Формирование траектории движения рабочего органа робота;
4. Моделирование процесса воспроизведения рабочим органом заданной траектории с внешним усилием и определение отклонений инструмента.

На первом этапе расчета определяются параметры промышленного робота. Для работы с роботами в *Matlab* используется пакет *Robotics System Toolbox*. При этом робот представляется в виде объекта *rigidBodyTree*, в котором кинематическая структура робота представляется в виде иерархического соединения жестких тел (звеньев) и соединяющих их шарниров. Создать объект *rigidBodyTree* можно двумя способами: с помощью представления Денавита-Хартенберга и с помощью файла в формате *URDF* (*Unified Robot Description Format*) – формат, используемый для описания роботов в *Robotic Operating System* (*ROS*). В первом случае в среде *Matlab* создается матрица с параметрами Денавита-Хартенберга для моделируемого робота, по которой последовательно создаются его соединения – звенья и шарниры. А во втором случае, файл в формате

URDF импортируется в *Matlab* с помощью функции *importrobot*. Второй подход является более универсальным, поскольку он позволяет учесть не только кинематическую структуру робота, но и его динамические свойства, такие как массу, центр тяжести, коэффициент трения и тензор инерции каждого звена, а также ограничения поворота шарниров, тогда как представление Денавита-Хартенберга информацию о данных параметрах не содержит.

Описание робота в формате *URDF* может быть составлено вручную или же с помощью специальных инструментов. Например, плагин *SW2URDF* позволяет создавать файл в формате *URDF* с описанием промышленного робота на основе его твердотельной модели в *SolidWorks*. Кроме того, большое количество готовых *URDF*-файлов для промышленных роботов уже разработаны сообществом и производителями роботов. В частности, большой вклад в адаптацию *ROS* для промышленных приложений и разработку открытых библиотек для этих целей внес проект *ROS-Industrial* [6].

Кроме кинематических и динамических характеристик, важным параметром робота является его жесткость. В робототехнике могут использоваться три подхода к моделированию жесткости: метод конечных элементов (МКЭ), матричный структурный анализ (МСА) и метод виртуальных пружин (МВП) [7].

При использовании МКЭ сложная структура робота разбивается на некоторое конечное число простых элементов, связь между которыми определяется с помощью соответствующих матриц жесткости. Преимуществом использования МКЭ является его высокая точность и возможность определения деформации в любой отдельно взятой части робота, а недостатком – высокая сложность вычисления. Возможность применения такого подхода зачастую ограничена памятью компьютера.

Метод МСА является упрощением МКЭ – в этом случае в качестве конечных элементов используются достаточно большие элементы – 3D-балки, при этом их количество, как правило, соответствует количеству звеньев робота. Преимуществом использования МСА является более простая по сравнению с МКЭ модель для анализа жесткости, а недостатком – трудность применения для анализа робота в нагруженном состоянии [8]. МКЭ и МСА как правило используются для анализа жесткости робота на стадии его проектирования, когда важна точность, а не скорость вычислений.

МВП является наиболее простым в реализации подходом для анализа жесткости робота. В

этом случае в стандартную жесткую недеформируемую модель добавляются виртуальные пружины, которые описывают упругие деформации звеньев робота. Такой подход обеспечивает разумный компромисс между точностью модели и вычислительной сложностью [9]. Преимуществом МВП является возможность его использования для прогнозирования и компенсации отклонения инструмента при механической обработке в режиме онлайн, то есть непосредственно в процесс обработки, а недостатком – сложность корректного подбора коэффициента жесткости пружин.

В разработанной модели для ускорения расчета используется МВП. В этом случае жесткость робота выражается в виде диагональной матрицы, размерность которой зависит от количества звеньев робота:

$$K_{\theta} = \text{diag}(k_1, k_1, \dots, k_j), \quad (1)$$

где K_{θ} – конфигурационная матрица жесткости; k_j – коэффициент жесткости j -го звена.

Для определения коэффициентов жесткости могут использоваться два подхода: аналитический и экспериментальный. В первом случае жесткость каждого звена робота рассчитывается на основе жесткости его отдельных элементов (таких как электродвигатель, вал, зубчатый ремень, волновой редуктор и др.) [10], а во втором для определения жесткости проводится серия экспериментов [11]. Экспериментальный подход является более точным, но требует больших временных затрат. Исследования показывают, что погрешность аналитического подхода для определения жесткости может достигать 17 % [12].

На втором этапе расчета определяется желаемая траектория движения инструмента. Для этого используется файл в формате *.csv*, который импортируется в *Matlab* с помощью функции *readtable*. Помимо траектории движения инструмента, входным параметром модели для расчета отклонений является и сила в процессе резания, которая в каждой точке движения инструмента представлена в виде матрицы:

$$F = [F_X \ F_Y \ F_Z \ T_X \ T_Y \ T_Z]^T, \quad (2)$$

где F_X, F_Y, F_Z – силы, воздействующие на инструмент в процессе обработки вдоль осей X, Y и Z соответственно; T_X, T_Y, T_Z – крутящие моменты, воздействующие на инструмент в процесс обработки вдоль осей X, Y и Z соответственно.

На третьем этапе расчета на основе желаемой траектории движения инструмента строится траектория движения рабочего органа робота. Она может быть построена как в декартовом, так и в конфигурационном пространствах. Для задач механической обработки оптимальным является

второй подход, так как он позволяет достичь высокой точности и плавности движения рабочего органа и инструмента, а также учитывает физические и кинематические ограничения робота, хотя и является более ресурсозатратным для реализации, поскольку в этом случае на каждом шаге вычислений приходится решать обратную задачу кинематики (ОЗК) [13].

Robotics System Toolbox позволяет использовать аналитические и численные методы для решения ОЗК. В разработанной модели используется аналитическое решение, составленное с помощью функций *analyticalInverseKinematics* и *generateIKFunction*. Для генерации траектории движения рабочего органа используется функция *minjerkpolytraj*, которая позволяет создать плавную траекторию с минимальным рывком, что особенно полезно в задачах, где требуется минимизировать вибрации и обеспечить плавность движения рабочего органа и инструмента, например, при полировке.

На четвертом этапе рассчитываются отклонения инструмента в каждой точке его движения. Как правило, расчет отклонений проводится в декартовом пространстве. Для этого из (1) определяется декартова матрица жесткости:

$$K_X = J^{-T}(K_{\theta} - K_C)J^{-1}, \quad (3)$$

где K_X – декартова матрица жесткости; J – матрица Якоби для робота в его текущей точке; K_C – комплементарная матрица жесткости, которая описывает влияние взаимодействий между различными степенями свободы робота на его жесткости.

В том случае, если робот в анализируемой конфигурации находится вдали от сингулярных положений, матрицей K_C при расчетах можно пренебречь [14]. Кроме того, для расчета отклонений инструмента удобнее работать не с матрицей жесткости, а с матрицей податливости:

$$C_X = K_X^{-1} = J(K_{\theta} - K_C)J, \quad (4)$$

где C_X – декартова матрица податливости:

$$C_X = \begin{bmatrix} C_{tt} & C_{tr} \\ C_{tr}^T & C_{rr} \end{bmatrix},$$

где C_{tt} – матрица, отвечающая за линейные перемещения инструмента; C_{tr} – матрица, которая описывает взаимосвязь между линейными и угловыми перемещениями инструмента; C_{rr} – матрица, отвечающая за угловые перемещения инструмента.

Зная матрицу податливости C_X и вектор внешних сил и моментов F , можно определить отклонения инструмента в любой точке траектории:

$$\Delta X = C_X F, \quad (5)$$

где ΔX – вектор отклонений инструмента в декартовом пространстве, который представляет собой матрицу размерностью 6×1 :

$$\Delta X = [d_x \ d_y \ d_z \ \delta_x \ \delta_y \ \delta_z]^T, \quad (6)$$

где d_x, d_y, d_z – отклонения инструмента вдоль осей X, Y и Z соответственно; $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ – отклонения углов поворота инструмента вокруг осей X, Y и Z соответственно.

Недостатком такого порядка расчета отклонений является отсутствие учета динамических параметров выполняемого процесса, а именно скоростей и ускорений шарниров, а также моментов сил, возникающих в шарнирах робота при движении инструмента по заданной траектории. Чтобы учесть динамические параметры процесса, необходимо перейти от декартового к конфигурационному пространству.

Для определения скоростей и ускорений шарниров в разработанной модели используется численное дифференцирование методом правосторонней разности [15], которое осуществляется сразу после генерации траектории движения рабочего органа. После чего, для расчета моментов сил решается обратная задача динамики (ОЗД). В *Robotics System Toolbox* для этого используется функция *inverseDynamics*, в основе которой лежит уравнение динамики робота [16]:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J(q)^T F_{ext}, \quad (7)$$

где $M(q)$ – матрица масс в конфигурационном пространстве для конфигурации q ; \ddot{q} – ускорения шарниров робота; $C(q, \dot{q})$ – матрица кориолисовых и центробежных сил для конфигурации q при скоростях шарниров \dot{q} ; $G(q)$ – вектор сил и моментов гравитации, необходимых для удержания всех шарниров при заданной гравитации; $J(q)$ – геометрический Якобиан; F_{ext} – матрица внешних сил.

При этом важно отметить, что матрица F_{ext} – это не тоже самое, что и матрица F из (2). Матрица F_{ext} содержит информацию о силах, действующих не только на инструмент, но и на другие звенья робота, а для ее создания используется функция *externalForce*.

По рассчитанным моментам сил можно по закону Гука определить отклонения шарниров в конфигурационном пространстве [17]:

$$\Delta q = K_{\theta}^{-1} \tau. \quad (8)$$

Тогда угол поворота шарниров (конфигурация робота) с учетом отклонений:

$$q = q_T + \Delta q, \quad (9)$$

где q – матрица с углами поворота шарниров, q_c – матрица с созданными с помощью решения ОЗК углами поворота шарниров, необходимыми

для движения инструмента по заданной траектории.

Чтобы перейти от конфигурационного к декартовому пространству нужно решить задачу прямой кинематики для углов поворота шарниров q . В *Robotics System Toolbox* для этого используется функция *getTransform*, которая позволяет получить матрицу однородного преобразования между выбранным звеном, в нашем случае инструментом, и базовой системой координат. Чтобы определить декартовые координаты из полученной матрицы однородного преобразования нужно использовать функцию *tform2trvec* для определения декартовых координат положения инструмента и функцию *tform2eul* для определения углов Эйлера, описывающих поворот инструмента в пространстве. Отсюда отклонения инструмента определяются как разность между желаемой и рассчитанной траекторией.

Основная часть. Разработанная модель для расчета отклонений инструмента была испытана на тестовой траектории движения инструмента из [18]. Тестовая траектория задается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = R^2 - r^2 \sin^2 \theta \end{cases}, \quad (10)$$

где были приняты следующие значения: $r = 0,15$ м; $R = 0,5$ м; $\theta = [0, 2\pi]$.

В качестве робота был выбран промышленный робот *ABB IRB 120*, матрица жесткости которого представлена в [12], а описание в формате *URDF* взято из [6].

На рис. 1 показано визуальное отображение выбранной модели робота в *Matlab* и тестовой траектории в начальной точке движения инструмента.

Значения сил и моментов в моделируемом процессе возрастали по экспоненциальному закону:

$$F(t) = F_M(1 - e^{-\alpha t}), \quad (11)$$

где F_M – максимальное значение силы в процессе обработки; α – параметр, определяющий скорость роста силы. В качестве значений были выбраны:

$$F_M = [5 \ 5 \ 20 \ 0,3 \ 0,3 \ 0,1]^T; \\ \alpha = 5.$$

Время прохождения инструментом по заданной траектории было выбрано равным 10 с. Рассчитанные в результате моделирования такой траектории суммарные отклонения инструмента по ориентации и положению показаны на рисунке 2, а на рисунках 3 и 4 показаны тестовая и

рассчитанная траектория движения инструмента
на интервалах времени 0,75–1,25 с и 4,83–5,33 с.

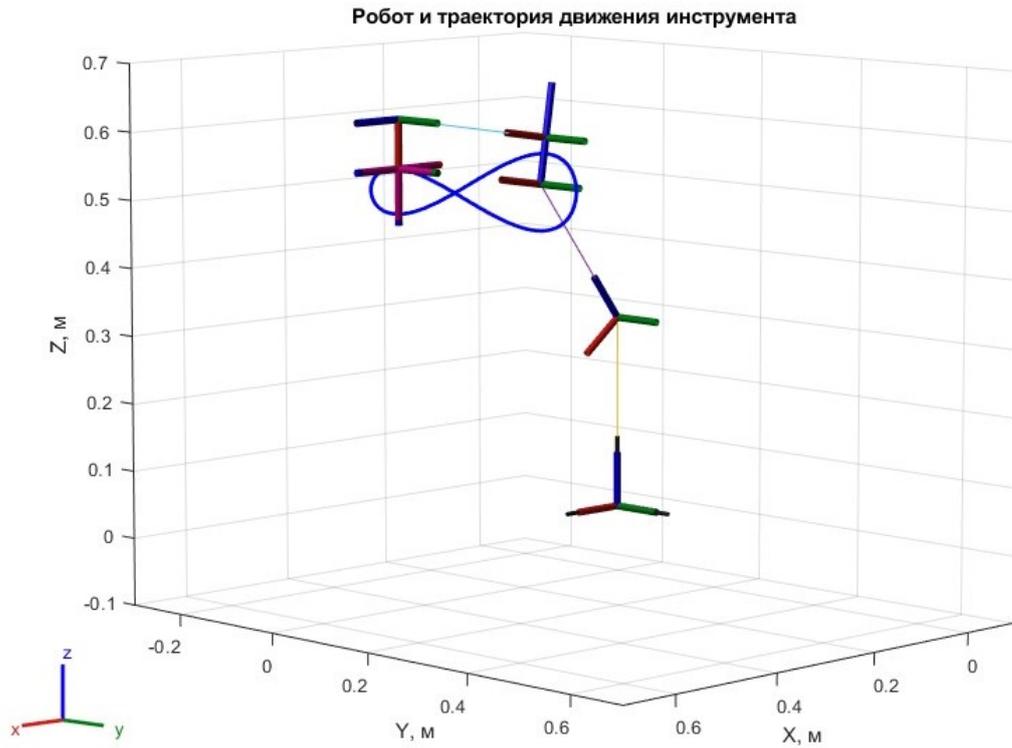


Рис. 1. Кинематическая структура робота и моделируемая траектория движения инструмента

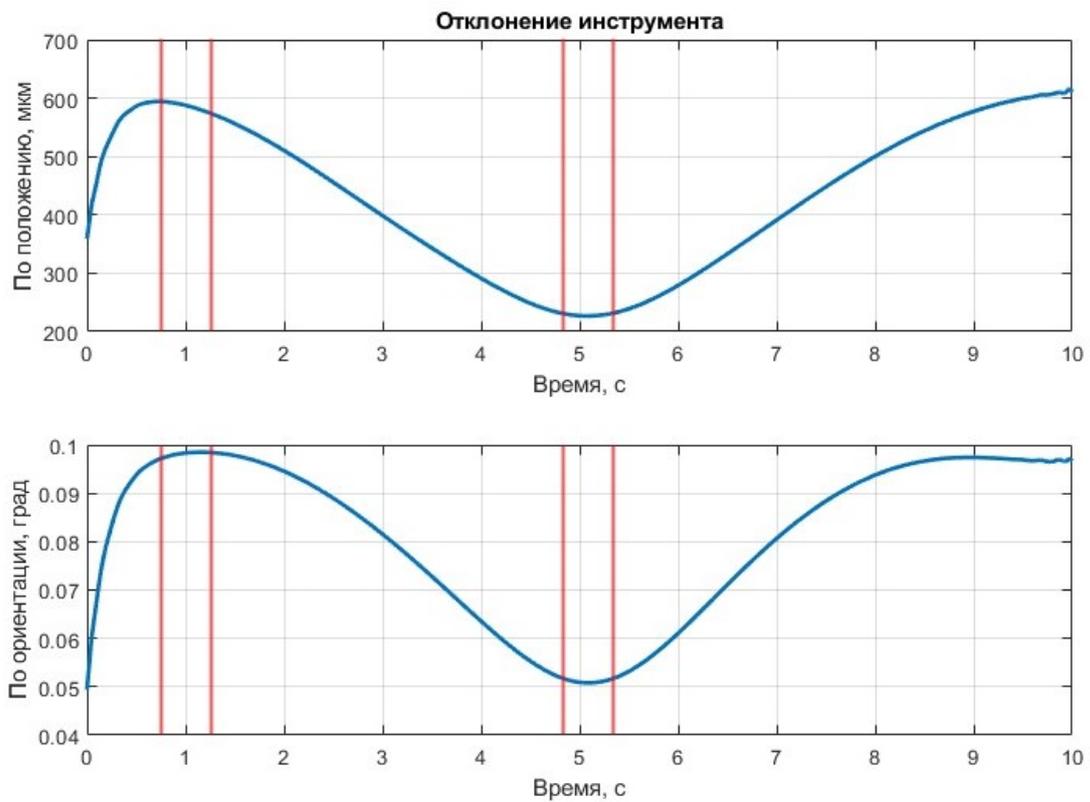


Рис. 2. Отклонение инструмента по ориентации и положению

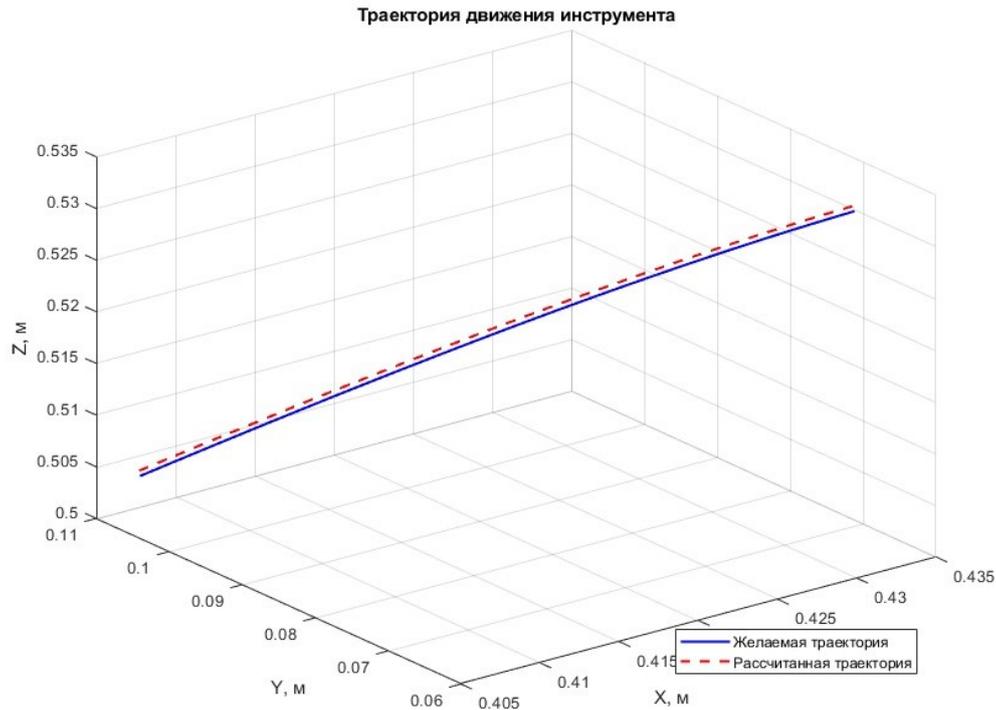


Рис. 3. Траектория движения инструмента на участке времени 0,75-1,25 с

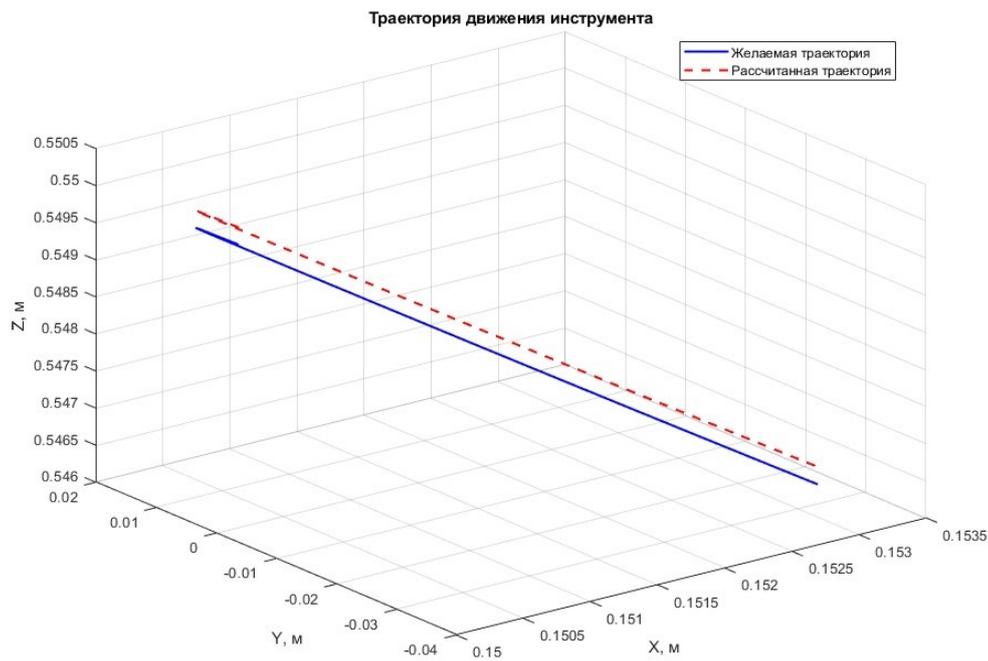


Рис. 4. Траектория движения инструмента на участке времени 4,83-5,33 с

Выводы

В рамках исследования была разработана математическая модель в Matlab для расчета отклонения инструмента от желаемой траектории в процессе роботизированной механической обработки с использованием метода виртуальных

пружин. Разработанная модель была использована для предсказания отклонений инструмента на тестовой траектории.

Анализ полученных графиков (рисунки 2–4) показывает, что наибольшие отклонения инструмента по положению и ориентации наблюдаются на участках времени 0–2 с и 8–10 с, при этом

даже в начальной точке, когда на инструмент не действуют внешние силы F , а также скорости и ускорения шарниров равны нулю, отклонения инструмента только под действием силы тяжести больше, чем на участке времени 3–7 с. Это объясняется выбранной исходной конфигурацией робота, которая в данном случае не является оптимальной. Поиск конфигурации с минимальной податливостью требует дополнительного анализа и планируется к рассмотрению в последующих исследованиях.

По полученным результатам можно сделать вывод, что при относительно малых скоростях звеньев основное влияние на отклонения инструмента оказывает конфигурация робота, а не динамические параметры процесса. Поэтому важной задачей, которую нужно решать при роботизированной обработке, является определение оптимального взаимного расположения робота и заготовки: их нужно располагать так, чтобы в процессе обработки робот постоянно находился в конфигурациях, максимально удаленных от сингулярных. Кроме того, при наличии избыточных степеней свободы у робота, нужно обязательно подбирать их оптимальные значения так, чтобы минимизировать отклонения инструмента в процессе механической обработки.

Для повышения точности предложенной модели рекомендуется дополнительно учитывать зазор между сочленениями робота, которые вносят в каждое звено робота дополнительную степень свободы, собственные колебания промышленного робота, а также использовать более точные подходы к определению параметров жесткости робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kiefer D., Luo X., Reimer A., Evans D. Robotic Machining: Status, Challenges and Future Trends // Proceedings of the 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Birmingham, United Kingdom. 2023. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICAC57885.2023.10275148.
2. Barsan A. A Brief Review of Robotic Machining // Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series. 2019. № 71. Pp. 9–13. DOI: 10.2478/aucts-2019-0003.
3. Caro S., Dumas C., Garnier S., Furet B. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany. 2013. Pp. 2921–2926. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630982.
4. Kim S.H., Nam E., Ha T.I., Hwang S. H., Lee J. H., Park S.H., Min B.K. Robotic Machining: A Review of Recent Progress // International Journal of

- Precision Engineering and Manufacturing. 2019. № 20. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12541-019-00187-w.
5. Belchior J., Guillo M., Courteille E., Maurine P., Leotoing L., Guines D. Off-line compensation of the tool path deviations on robotic machining: Application to incremental sheet forming // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013. № 29. Pp. 58–69. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.10.008.
6. ROS-Industrial [Электронный ресурс]. URL: <https://rosindustrial.org/> (дата обращения: 09.04.2025)
7. Wu K., Li J., Zhao H., Zhong Y. Review of Industrial Robot Stiffness Identification and Modeling // Applied Sciences. 2022. Vol. 12(17). 8719. Pp. 1–24. DOI: 10.3390/app12178719.
8. Klimchik A., Wu Y., Pashkevich A., Caro S., Furet B. Optimal Selection of Measurement Configurations for Stiffness Model Calibration of Anthropomorphic Manipulators // Applied Mechanics and Materials. 2012. № 162. Pp. 161–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.162.161.
9. Попов Д.И., Климчик А.С. Моделирование жесткости для шагающих роботов // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 4. С. 631–651. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-4-631-651.
10. Chen S., Zhang T., Shao M. A 6-DOF articulated robot stiffness research // Proceeding of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China. 2016. Pp. 3230–3235. DOI: 10.1109/WCICA.2016.7578374.
11. Gao K., Zhou X., Wang R., Fan M., He X. Joint Stiffness Identification Based on Robot Configuration Optimization Away from Singularities // Applied Sciences. 2023. Vol. 13 (8). 4922. Pp. 1–15. DOI: 10.3390/app13084922.
12. He Z., Song M., Zhang X., Huang G. A New Prediction Method of Displacement Errors Caused by Low Stiffness for Industrial // Robot. Sensors. 2022. Vol. 22. № 16, 5963. Pp. 1–13. DOI: 10.3390/s22165963.
13. Peters J., Schaal S. Learning operational space control // Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS). Philadelphia. 2006. Pp. 1–8.
14. Gao K. Optimization of Robot Milling Accuracy Based on a New Stiffness Performance Index // IEEE Access. 2024. № 12. Pp. 105211–105218. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3435911.
15. Рафальский И.В., Арабей А.В., Луцки П.Е. Прикладная информатика: пособие по специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)». Минск: БНТУ, 2021.
16. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms: Springer. United States. 2008. 272 p.

17. Souflas T., Gerontas C., Bikas H., Stavropoulos P. On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based Process Planning Approach // *Machines*. 2024. Vol. 12. (8). 521. Pp. 1–25. DOI: 10.3390/machines12080521.

18. Ni H., Ji S., Ye Y. Redundant Posture Optimization for 6R Robotic Milling Based on Piecewise-Global-Optimization-Strategy Considering Stiffness, Singularity and Joint-Limit // *Symmetry*. 2022. Vol. 14. (10). 2066. Pp. 1–14. DOI: 10.3390/sym14102066.

Информация об авторах

Волков Дмитрий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры инновационного машиностроения. E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru. Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

Воробьев Павел Сергеевич, аспирант кафедры инновационного машиностроения. E-mail: vorobps@gmail.com. Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева. Россия, 152934, Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

Поступила 10.06.2025 г.

© Волков Д.И., Воробьев П.С., 2025

Volkov D.I., *Vorobyev P.S.

P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University

**E-mail: vorobps@gmail.com*

MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINATION OF TOOL DEVIATIONS FROM THE DESIRED TRAJECTORY IN ROBOTIC MACHINING CONSIDERING THE ROBOT'S STIFFNESS

Abstract. *The article examines the advantages and disadvantages of using industrial robots to control a tool during machining operations. It is concluded that the main drawback of robots is their low stiffness. A mathematical model has been developed to calculate the deviation of the tool from the desired trajectory during robotic machining. To predict deviations, the proposed model uses the virtual joint method, which provides a reasonable compromise between modeling accuracy and computational complexity. The model is implemented in Matlab using the Robotics System Toolbox and a URDF description of the industrial robot. It takes into account external forces and torques, as well as dynamic parameters such as velocity and acceleration of the robot's links. Tool deviations are calculated in both joint and Cartesian spaces. The article presents the results of model testing on a sample tool trajectory using the ABB IRB 120 industrial robot. Based on the modeling results, it is concluded that the robot's configuration significantly affects the tool positioning accuracy. It is shown that even in the absence of external loads, an unsuccessful choice of robot configuration can cause significant tool deviations due to gravity. The developed model can be used as a tool to improve the accuracy of robotic machining and to optimize production process parameters.*

Keywords: *industrial robot, dynamic stiffness, virtual joint modeling, trajectory, Matlab.*

REFERENCES

1. Kiefer D., Luo X., Reimer A., Evans D. Robotic Machining: Status, Challenges and Future Trends. Proceedings of the 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC). Birmingham, United Kingdom. 2023. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICAC57885.2023.10275148.

2. Barsan A. A Brief Review of Robotic Machining. *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*. 2019. Vol. 71. Pp. 9–13. DOI: 10.2478/aucts-2019-0003.

3. Caro S., Dumas C., Garnier S., Furet B. Workpiece placement optimization for machining operations with a KUKA KR270-2 robot. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany. 2013. Pp. 2921–2926. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630982.

4. Kim S.H., Nam E., Ha T.I., Hwang S.H., Lee J.H., Park S.H., Min B.K. Robotic Machining: A Review of Recent Progress. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. No. 20. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12541-019-00187-w.

5. Belchior J., Guillo M., Courteille E., Maurine P., Leotoing L., Guines D. Off-line compensation of the tool path deviations on robotic machining: Application to incremental sheet forming. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2013. No. 29. Pp. 58–69. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.10.008.

6. ROS-Industrial. Available at: <https://rosindustrial.org/> (accessed 9 April 2025)

7. Wu K., Li J., Zhao H., Zhong Y. Review of Industrial Robot Stiffness Identification and Modeling. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 17, 8719. Pp. 1–24. DOI: 10.3390/app12178719.

8. Klimchik A., Wu Y., Pashkevich A., Caro S., Furet B. Optimal Selection of Measurement Configurations for Stiffness Model Calibration of Anthropomorphic Manipulators. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. No. 162. Pp. 161–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.162.161.
9. Popov D.I., Klimchik A.S. Stiffness modeling for anthropomorphic robots [Modelirovanie zhestkosti dlya shagayushchih robotov]. *Computer Research and Modelling*. 2019. Vol. 11. No. 4. Pp. 631–651. DOI: 10.20537/2076-7633-2019-11-4-631-651. (rus)
10. Chen S., Zhang T., Shao M. A 6-DOF articulated robot stiffness research. *Proceeding of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Guilin, China. 2016. Pp. 3230–3235. DOI: 10.1109/WCICA.2016.7578374.
11. Gao K., Zhou X., Wang R., Fan M., He X. Joint Stiffness Identification Based on Robot Configuration Optimization Away from Singularities. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 8. 4922. Pp. 1–15. DOI: 10.3390/app13084922.
12. He Z., Song M., Zhang X., Huang G. A New Prediction Method of Displacement Errors Caused by Low Stiffness for Industrial. *Robot. Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 16. 5963. Pp. 1–13. DOI: 10.3390/s22165963.
13. Peters J., Schaal S. Learning operational space control. *Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS)*. Philadelphia. 2006. Pp. 1–8.
14. Gao K. Optimization of Robot Milling Accuracy Based on a New Stiffness Performance Index. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 105211–105218. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3435911.
15. Rafal'skij I.V., Arabej A.V., Lushchik P.E. *Applied informatics: manual for specialty 1-42 01 01 «Metallurgical production and materials processing (by areas)» [Prikladnaya informatika: posobie po special'nosti 1-42 01 01 «Metallurgicheskoe proizvodstvo i materialoobrabotka (po napravleniyam)»]*. Minsk: BNTU. 2021. (rus)
16. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*: Springer. United States. 2008. 272 p.
17. Souflas T., Gerontas C., Bikas H., Stavropoulos P. On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based Process Planning Approach. *Machines*. 2024. Vol. 12. No. 8. 521. Pp. 1–25. DOI: 10.3390/machines12080521.
18. Ni H., Ji S., Ye Y. Redundant Posture Optimization for 6R Robotic Milling Based on Piecewise-Global-Optimization-Strategy Considering Stiffness, Singularity and Joint-Limit. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. No. 10. 2066. Pp. 1–14. DOI: 10.3390/sym14102066.

Information about the authors

Volkov, Dmitry I. DSc, Professor. E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru. P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University. Russia, 152934, Rybinsk, st. Pushkina, 53.

Vorobyev, Pavel S. Postgraduate student. E-mail: vorobps@gmail.com. P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University. Russia, 152934, Rybinsk, st. Pushkina, 53.

Received 10.06.2025

Для цитирования:

Волков Д.И., Воробьев П.С. Математическая модель для определения отклонений инструмента от желаемой траектории в процессе роботизированной механической обработки с учетом жесткости робота // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 105–113. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-105-113

For citation:

Volkov D.I., Vorobyev P.S. Mathematical model for determination of tool deviations from the desired trajectory in robotic machining considering the robot's stiffness. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2026. No. 2. Pp. 00–00. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-105-113

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123

¹Карелина М.Ю., ^{1,*}Акулов А.А., ¹Подгорный А.В., ¹Логанов Н.В.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

*E-mail: a.akulov.98@mail.ru

СТОЙКОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ К ПРИМЕНЯЕМЫМ АГРОХИМИКАТАМ

Аннотация. В данной статье исследуется физико-химическая деградация поверхностей систем технического зрения (СТЗ), используемых в агропромышленном комплексе (АПК), а также надежность систем компьютерного зрения, работающих в химически агрессивных средах. Поскольку автономная сельскохозяйственная техника становится все более зависимой от оптических данных для навигации и мониторинга урожая, надежность интерфейсов камер при длительном воздействии удобрений, гербицидов и пестицидов становится важнейшей инженерной задачей. В исследовании представлен подробный анализ взаимодействия между химическими составляющими широко используемых агрохимикатов, где особое внимание уделяется активным ингредиентам, органическим растворителям и поверхностно-активным веществам, а также корпусам модулей технического зрения. Экспериментальная основа включает сравнительную оценку стойкости материалов систем технического зрения при контролируемом воздействии различных концентраций реагентов. Основным пунктом данного исследования являются механизмы разрушения материалов. В ходе исследования проведена корреляция продолжительности воздействия и концентрации реагента с количественными показателями оптических характеристик, включая потерю пропускания в видимом и ближнем инфракрасном спектрах и увеличение шероховатости поверхности, а также химический анализ взаимодействия реагентов с материалами систем технического зрения.

Ключевые слова: точное земледелие, машинное зрение, химическая деструкция, оптические полимеры, агрохимикаты, надежность датчиков.

Введение. Исследования в области агропромышленного комплекса (АПК) активно меняются в сторону широкого внедрения автономных роботизированных систем и интеллектуального оборудования, предназначенных для оптимизации урожайности сельскохозяйственных культур и минимизации потребления ресурсов. Системы технического зрения (СТЗ) обладают ключевым значением в технологической трансформации областей таких задач, как автономная навигация, анализ сельскохозяйственных культур, распознавание сорняков и вредителей в режиме реального времени и др. Однако в условиях АПК оптические приборы работают в среде, сильно отличающейся от контролируемой лабораторной. Условия работы интеллектуальных систем технического зрения характеризуются наличием химически активных сред, которые образуются при распылении жидких удобрений, гербицидов, фунгицидных средств и пестицидов. Агрохимические реагенты представляют собой сложные многокомпонентные смеси, содержащие активные биологические агенты, агрессивные органические растворители, поверхностно-активные вещества и регуляторы кислотности, которые предназначены для усиления проникающей способности и, соответственно, эффективности. Современные системы машинного зрения обычно защищены неорганическим силикатным стеклом или оптическими полимерами, такими как поликарбонат (ПК) и полиметилметакрилат (ПММА),

корпус систем изготавливается из анодированного алюминия (Al_2O_3) и нержавеющей стали. Несмотря на свою механическую прочность, эти материалы обладают различной степенью химической стойкости. Длительный контакт с агрохимикатами может вызвать гидролиз, растрескивание под воздействием растворителя или травление поверхности, что приводит к повышенной шероховатости и помутнению, а также к нелинейному изменению оптических характеристик систем. Подобные изменения снижают качество входных данных, тем самым снижая точность вывода сверточных нейронных сетей и, в конечном счете, снижая экономическую эффективность роботизированных систем. Существующие исследования в основном посвящены механическим методам очистки или программным алгоритмам удаления загрязнений, игнорирующим необратимый характер химической эрозии [1]. Следовательно, существует необходимость в исследовании совместимости конструкционных материалов с химической средой агропромышленного комплекса. Целью данного исследования является разработка теоретической основы для прогнозирования долговечности периферийных устройств СТЗ путем классификации химических компонентов и молекулярного взаимодействия составляющих, а также предоставление научно обоснованных рекомендаций по выбору химически стойких материалов для сельскохозяйственной робототехники

Материалы и методы. В исследовании используется аналитическая и теоретическая методология для прогнозирования взаимодействия между сельскохозяйственными реагентами и составляющей систем технического зрения. Данный подход состоит из трех основных этапов: анализ химического состава реагентов, структурная характеристика СТЗ и теоретическое моделирование механизмов разрушения поверхности. Была проведена классификация компонентов широко используемых агрохимических реагентов, которые вступают в реакцию с полимерами и неорганическим стеклом. Агрохимический реагент – это сложный активный раствор, специально разработанный для обеспечения высокой проникающей способности и эффективности. Данные растворы по своей природе обладают коррозионным свойствам по отношению к небиологическим поверхностям [2]. Агрессивные компоненты, классифицированные по их химической роли и структурированные в таблице 1, служат основой для определения первостепенных

разрушителей в агропромышленной среде. Регуляторы pH имеют высокий показатель кислотности (например, фосфорная кислота) и обладают высокой щелочностью (например, гидроксид натрия). Они значительно ускоряют разложение материала в результате гидролиза и химического травления. Неорганические соли, которые часто присутствуют в удобрениях, таких как нитрат аммония, способствуют ионизации, которая может вызывать окислению и способствовать электролизу.

Органические растворители и поверхностно-активные вещества (ПАВ) обладают высокой эффективностью при проникновении в микротрещины элементов СТЗ и способствуют образованию трещин в полимерных материалах, тем самым увеличивая риск разрушения материала поверхности от химического воздействия [3]. А также активные ингредиенты часто образуют устойчивые связи с ионами металлов (например, ионы натрия и кальция ЭДТА) в структуре стекла.

Таблица 1

Перечень химических компонентов растворов

Составляющие реагентов	Вещество/группа реагента	Химическая функция	Химическая формула
pH регуляторы	Лимонная кислота, фосфорная кислота, гидроксид натрия	Кислотно-щелочной обмен	C H NaOH
Неорганические соли	Нитрат аммония, хлорид калия	Электролиз, окисление	NH ₄ NO ₃
Органические растворители	Ароматические углеводороды, спирты	Разбавление вещества	C C ₃ H ₈ O
Поверхностно-активные вещества	Неионные (производные ПЭГ)	Поверхностное натяжение	C ₈ H ₁₇ -C ₆ H ₄ -O-(CH ₂ -CH ₂ -O) ₉₋₁₀ H
Активные вещества	Фосфорорганические соединения, ЭДТА	Действующий реагент	C C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈

Проанализирован состав неорганического стекла и оптических полимеров в составе линз, металлов (анодированный алюминий, нержавеющая сталь) в конструкции корпуса, УФ-клея на основе акрилата для фиксации оптических элементов, а также силиконового герметика (RTV) на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) для уплотнения разъемов и стыков корпуса. Выбор материалов был сделан исходя из того, что именно они в подавляющем большинстве используются в настоящее время в СТЗ агропромышленного комплекса. Неорганическое щелочно-силикатное стекло ценится за его высокую твердость и превосходную устойчивость к царапинам, что делает его идеальным материалом для использования в сложных условиях [4].

Поликарбонат (PC) и полиметилметакрилат (PMMA) являются предпочтительными из-за их высокой ударопрочности, легкого веса и эконо-

мичности [5]. Анодированный алюминий и нержавеющая сталь обладают оптимальным соотношением прочности и веса, хорошей теплопроводностью, устойчивостью к коррозии и являются легкообрабатываемыми материалами.

УФ-клеи имеют высокую прочность сцепления (адгезия) со стеклом, металлом и пластиком, а также после отверждения образуют очень твердый, стойкий к вибрациям и химикатам шов [6]. Силиконовые герметики сохраняют эластичность в широком диапазоне температур, обладают хорошей устойчивостью к влаге и не вызывают коррозии металлов.

Для каждого материала в ходе анализа учитывались его фундаментальная химическая структура и состав, чтобы определить исходные показатели химической реактивности. Результаты анализа материалов, наиболее часто используемых в конструкции СТЗ, обобщены в таблице 2.

Перечень материалов в конструкции СТЗ

Материал	Функция	Структура	Химическая формула
Неорганическое стекло	Защита оптических и внутренних компонентов системы	Аморфная сетка из SiO ₂	(SiO ₂) _x · (Na ₂ O) _y
Поликарбонат (ПК)		Карбонатная цепочка	[C ₁₆ H ₁₄ O ₃] _n
Полиметилметакрилат (ПММА)		Побочные группы метилового эфира	[C ₅ H ₈ O ₂] _n
Анодированный алюминий	Укрепление корпуса	Алюминиевая основа с добавлением слоя оксида	Al ₂ O ₃
Нержавеющая сталь		Кристаллическая решетка Fe-Cr-Ni	F
УФ-клей (акрилаты)	Фиксация оптических элементов (объектив, защитное стекло)	Полимер с поперечными химическими связями (сшитый полимер)	C ₃ H ₈ O ₂
Силиконовый герметик	Уплотнение разъемов и стыков корпуса	Сетка ПДМС	3

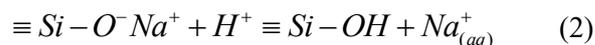
Анализ физико-химических взаимодействий между агрохимическими реагентами и материалами систем машинного зрения выявляет два различных способа разрушения: поверхностное травление, вызванное ионным обменом в неорганических стеклах, и деполимеризация в сочетании с растрескиванием под действием растворителя в органических полимерах [7]. Применение кинетических моделей, разработанных в рамках методики, демонстрирует, что скорость этих процессов разложения зависит от концентрации активных химических веществ и температуры окружающей среды.

В случае щелочно-силикатного стекла основным является разрушение кремнеземной сетки регуляторами pH. В свою очередь силикатная сетка устойчива к воздействию кислых сред (за исключением плавиковой кислоты). Наличие щелочных компонентов (pH > 9), которые часто содержатся в моющих растворах или специальных смесях удобрений с составом гидроксидов (например, NaOH), приводит к прямому повреждению поверхности [8]. Путь реакции начинается с нуклеофильной атаки гидроксильного иона (OH⁻) на атом кремния, что приводит к растворению сетки и образованию растворимых силикатов. Для описания этого процесса можно использовать следующее стехиометрическое уравнение:



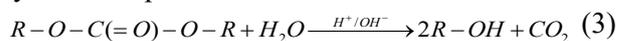
Одновременно в кислой среде, характерной для многих жидких удобрений (например, содержащих фосфорную кислоту), наблюдается сдвиг в механизме разложения в сторону ионообменного процесса. Процесс замещения включает в себя замену ионов щелочных металлов (Na⁺, Ca²⁺), находящихся во внутренних пространствах

стеклянной сетки, на протоны (H⁺). Данные протоны образуются из кислой среды. Также в процессе выщелачивания образуется пористый поверхностный слой, богатый кремнеземом. Хотя этот процесс не нарушает целостность объема, он значительно изменяет показатель преломления поверхностного слоя

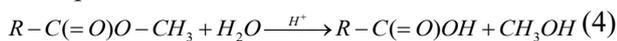


Истощение ионов приводит к образованию гидратированного слоя с более низким показателем преломления, чем у обычного стекла, что приводит к появлению тонкопленочных интерференционных эффектов и повышенной восприимчивости поверхности к механическому истиранию [9]. Механизмы деградации оптических полимеров более сложны из-за присутствия реакционноспособных функциональных групп в полимерной основе.

Поликарбонат (ПК) обладает высокой ударопрочностью, однако он значительно уязвим при воздействии щелочных реагентов, что подчеркивает важность его применения. Карбонатная связь (-O-C(=O)-O) была идентифицирована как основное место химического воздействия [10]. Расщепление этой связи катализируется гидроксидными ионами или протонами из агрохимического раствора, что приводит к снижению молекулярной массы и сопутствующему выделению бисфенола и диоксида углерода [11]. Данная реакция приводит к разрыву цепи, который макроскопически проявляется в виде увеличения хрупкости поверхности и "пожелтения" хрусталика. Реакцию гидролиза можно обобщить следующим образом:



Аналогичным образом полиметилметакрилат (РММА) подвергается гидролизу по побочным группам сложного эфира (-COOCH₃) [12]. Воздействие агрохимикатов высокой кислотности приводит к превращению сложноэфирной группы в карбоновую, что в свою очередь приводит к выделению метанола. Это химическое превращение повышает гидрофильность поверхности полимера, способствуя поглощению воды (набуханию) и дальнейшему ускорению процесса разложения.



Было проведено теоретическое моделирование разрушения поверхности для анализа взаимодействия агрессивных химических компонентов с оптическим оборудованием. Последствия химического воздействия моделируются с использованием двух основных теоретических подходов. Скорость эрозии материала, которая имеет решающее значение для прогнозирования долговечности, теоретически моделируется с использованием кинетического подхода, основанного на уравнении Аррениуса [13]. Скорость растворения описывается следующим образом:

$$R_d = A \cdot C_a^n \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (5)$$

где R_d – скорость растворения; A – предэкспоненциальный коэффициент; C_a – концентрация действующего реагента; n – порядок реакции; E_a – энергия реакции, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

Прямым следствием химической деструкции является изменение поверхности стекла, что коррелирует с ее оптическим воздействием. Результирующее увеличение шероховатости поверхности, которое является основной причиной рассеянного света и снижения качества изображения, определяется количественно с использованием теоретического среднеквадратичного значения шероховатости R_q [14]. Прогнозируемая R_q после длительного воздействия рассчитывается на основе расчетной равномерной глубины эрозии, $H_{erosion}$ [15].

$$R_q \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}, \quad (6)$$

где h_i – прогнозируемый профиль высоты поврежденной поверхности, м.; \bar{h} – средняя высота поверхности, м.; N – количество точек профиля.

Прогнозируемое увеличение R_q впоследствии будет использовано для оценки снижения спектральных коэффициентов пропускания в инфракрасном диапазоне (NIR), что является окончательным показателем для оценки ухудшения характеристик машинного зрения.

Основная часть. По результатам исследования агрохимических реагентов (удобрений, пестицидов, гербицидов) и их влияния на материалы систем технического зрения сформирована сводная таблица 3, позволяющая оперативно определять наиболее предпочтительные материалы для изготовления периферийных устройств СТЗ, эксплуатируемых в условиях воздействия агрохимических реагентов.

Основываясь на уравнении 5 (кинетическая модель Аррениуса), была получена теоретическая зависимость скорости деградации материала от температуры окружающей среды. График зависимости (рис. 1) показывает, как скорость разложения реагирует на температурные изменения, характерные для условий эксплуатации в условиях агропромышленного комплекса. Была показана зависимость скорости гидролитической деструкции (R_d) поликарбоната от температуры окружающей среды при воздействии щелочных реагентов (рН 10), рассчитанной с использованием модели Аррениуса. Кривая иллюстрирует экспоненциальное ускорение эрозии материала при повышении рабочей температуры сельскохозяйственной техники с 20 до 60 градусов по Цельсию.

Применяя кинетическую модель Аррениуса (уравнение 5), описанную в методике и представленную в виде зависимости на рисунке 1, следует вывод о том, что скорость растворения R_d экспоненциально возрастает с повышением температуры. В полевых условиях, когда корпуса камер могут сильно нагреваться из-за воздействия прямых солнечных лучей, энергетический барьер активации, обозначаемый E_a , преодолевается легче, что приводит к ускорению скорости травления. Данная непрерывная эрозия приводит к неравномерному разложению материала, увеличивая среднеквадратичную шероховатость (R_q), что было смоделировано уравнением 6.

Увеличение R_q оказывает существенное влияние на светопропускаемость. По мере приближения масштаба шероховатости к длине волны падающего света, т.е. когда $R_q \approx \lambda$, явление рассеяния становится преобладающим над зеркальным пропусканием, что приводит к уменьшению передаточной функции модуляции (MTF), что приводит к размытию изображения и снижению контрастности. В частности, интенсивность рассеяния (I_s) пропорциональна квадрату амплитуды шероховатости, что отражено в уравнении 7.

$$I_s \propto \left(\frac{4\pi R_q \cos \theta}{\lambda}\right)^2 \quad (7)$$

Таблица 3

Сравнительная характеристика химической стойкости материалов СТЗ

Материал в конструкции СТЗ	Основная функция	Ключевые уязвимости (типы реагентов)	Рекомендуемые условия применения (типы реагентов)	Прогнозируемый эффект при длительном воздействии
Неорганическое силикатное стекло	Защита оптических и внутренних компонентов	Высокощелочные реагенты (pH >9, e.g., NaOH): разрушают сетку Si-O-Si. Кислые реагенты (e.g., H ₂ PO ₄): ионообмен, выщелачивание. <i>Устойчиво к кислотам, кроме плавиковой.</i>	Нейтральные или слабобокислые растворы. Кратковременный контакт с большинством агрохимикатов при условии оперативной очистки.	Помутнение, снижение светопропускания, образование пористого слоя, интерференционные искажения, повышенная абразивная уязвимость.
Поликарбонат (ПК)	Защита оптических компонентов (лёгкий, ударопрочный)	Щелочные реагенты: гидролиз карбонатной связи (-O-C(=O)-O-). Органические растворители: растрескивание, набухание.	Слабобокислые или нейтральные среды. Избегать прямого контакта с щелочными солями и растворителями.	Пожелтение, увеличение хрупкости, растрескивание, значительная потеря оптической прозрачности.
Полиметилметакрилат (ПММА, орг-стекло)	Защита оптических компонентов (оптически прозрачный)	Кислотные реагенты: гидролиз сложноэфирной группы (-COOCH ₃). Органические растворители.	Слабощелочные или нейтральные среды. Избегать контакта с кислыми удобрениями и растворителями.	Гидролиз до карбоновой кислоты, повышение гидрофильности, набухание, помутнение.
Анодированный алюминий (Al ₂ O ₃ слой)	Корпус, крепление	Сильные кислоты и щёлочи: могут повредить оксидный слой. Соли (e.g., нитрат аммония): риск подповерхностной коррозии при повреждении слоя.	Большинство реагентов при сохранности оксидного слоя. Требуется защита от абразивного воздействия, нарушающего анодирование.	Точечная коррозия, разрушение защитного слоя, потеря внешнего вида и структурной целостности.
Нержавеющая сталь (Fe-Cr-Ni)	Корпус, силовые элементы	Хлорид-ионы (в некоторых солевых удобрениях/ПАВ): риск питтинговой коррозии. Кислые среды: общая коррозия.	Широкий спектр реагентов, особенно нейтральных и слабобокислых. Предпочтительный выбор для корпусов в агрессивных средах.	Появление точечной коррозии, общее потускнение поверхности.
УФ-клей (акрилаты)	Фиксация оптических элементов	Органические растворители: набухание, размягчение. Щёлочи: возможный гидролиз.	Для внутренней фиксации, защищённой от прямого контакта с реагентами. Требуется герметичного корпуса.	Потеря адгезии, размягчение или растрескивание шва, нарушение герметичности.
Силиконовый герметик (ПДМС)	Уплотнение разъемов и стыков	Обладает высокой химической инертностью. Наименее уязвимый материал из рассмотренных.	Все типы агрохимических реагентов. Идеальный выбор для уплотнений в любых химических средах АПК.	Минимальная деградация. Сохраняет эластичность и герметизирующие свойства.

Основываясь на этой зависимости рассеяния, выводится корреляция, которая демонстрирует критическое влияние топологии поверхности на целостность сигнала (рис. 2).

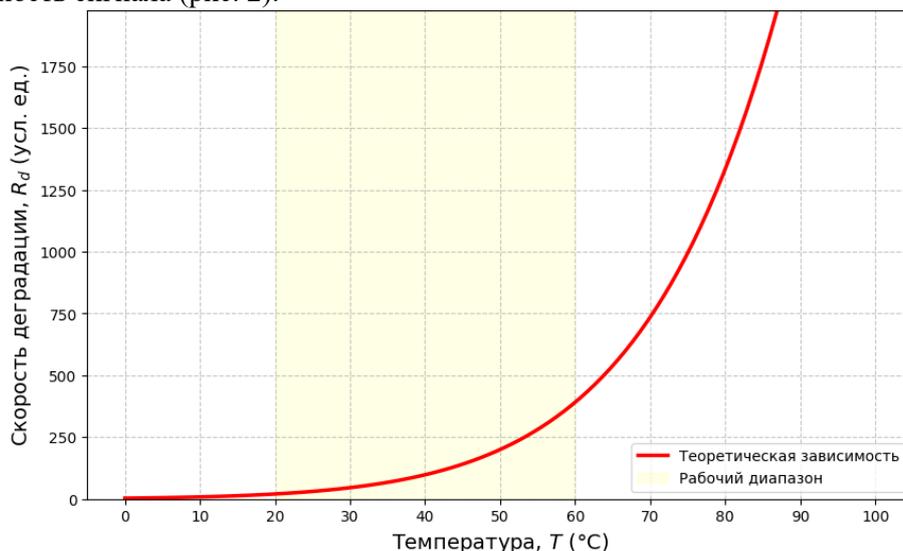


Рис. 1. Зависимость скорости деградации материала от температуры окружающей среды

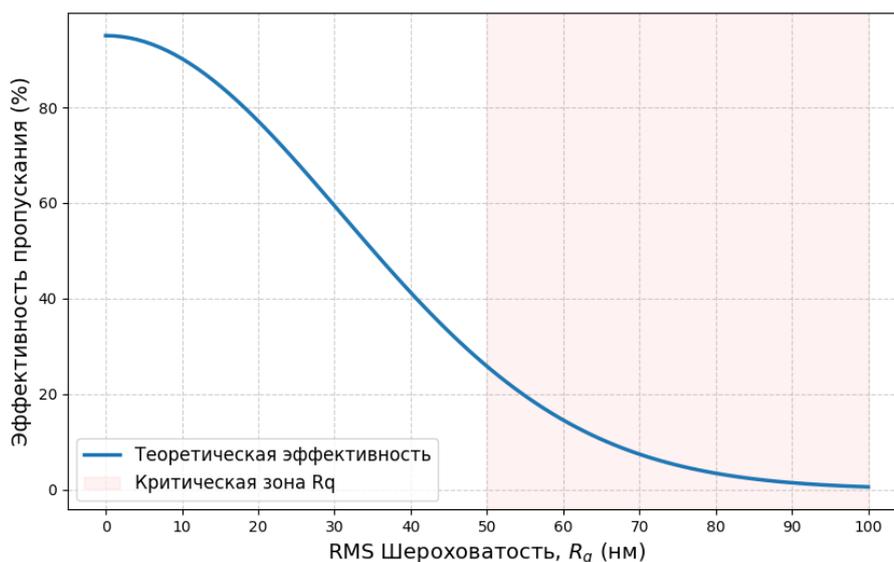


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от эффективности оптического пропускания

Была установлена следующая теоретическая корреляция: увеличение шероховатости поверхности свидетельствует об уменьшении эффективности оптического пропускания (%) в видимой области спектра ($\lambda = 550$ нм). График демонстрирует, что шероховатость, превышающая 100 нм, приводит к критической потере интенсивности света, которая падает ниже порога, необходимого для эффективного вывода нейронной сети.

Выводы. В настоящем исследовании была установлена аналитическая основа для определения несовместимости материалов путем систематической классификации ключевых агрессивных компонентов, включая регуляторы pH, органические

растворители и поверхностно-активные вещества, а также характеристики молекулярных структур распространенных оптических подложек (щелочно-силикатное стекло, поликарбонат и ПММА).

Теоретический анализ выявил два основных необратимых пути деградации:

1. В случае стекла на основе неорганических силикатов основной механизм заключается в химическом травлении и ионном выщелачивании, которые в основном осуществляются с помощью высокощелочных или кислотных реагентов. Эти реагенты разрушают структуру Si-O-Si и изменяют показатель преломления поверхности.

2. В случае оптических полимеров уязвимость связана с гидролитическим расщеплением сложноэфирных и карбонатных связей, в результате чего молекулярная масса значительно снижается и повышается хрупкость. Этот процесс еще больше осложняется наличием органических растворителей, которые способствуют образованию трещин и набуханию, вызванным растворителем.

Исследование продемонстрировало экспоненциальную зависимость скорости деградации от температуры окружающей среды, подчеркнув, что регулирование температуры является критическим фактором для продления срока службы датчиков в теплом климате. Теоретическое моделирование шероховатости поверхности продемонстрировало критическую корреляцию между среднеквадратичной шероховатостью (R_q), вызванной химической эрозией, и снижением эффективности оптического пропускания. Данная потеря зеркального отражения непосредственно соответствует существенному снижению отношения сигнал/шум и функции передачи модуляции. Следовательно, это снижает надежность и точность вывода встроенных нейронных сетей.

Обобщение результатов дает ценные, основанные на фактических данных рекомендации по выбору материалов, отдавая приоритет свойствам химической стойкости для долгосрочного использования. Это обеспечивает стабильную производительность и высокую экономическую эффективность автономных сельскохозяйственных роботизированных систем.

Благодарности. Данная статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка программного обеспечения в интересах агропромышленного комплекса для мониторинга состояния ботвы и плодов тепличных растений с помощью машинного зрения и искусственного интеллекта» (шифр научной темы FFSM-2025-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дронина А.А., Зарипова Р.С. Возможные пути совершенствования агропромышленного комплекса с использованием сквозных технологий // Агротехника и энергообеспечение. 2022. № 4(37). С. 238–242. EDN PНKORP.
2. Захаренко В.А. Агрохимические аспекты химической безопасности пестицидов // Агрохимия. 2022. № 1. С. 50–57. DOI: 10.31857/S0002188122010112. EDN SQJYWY.
3. Акулов А.А., Омельченко Н.А., Талдыкин Д.С., Ганжа Н.М. Перспективы и эффективность применения систем машинного зрения в агропромышленном комплексе Российской Федерации // АКТУАЛЬНЫЕ проблемы СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА, науки и ОБРАЗОВАНИЯ: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 августа 2025 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. С. 14–19. EDN RSFSOQ.
4. Antropova N.S., Ushakova O.V. Prospects for studying tetracycline group antibiotics in the process of their accumulation in soils and translocation into plants // V international Conference "actual scientific & technical issues of chemical safety" (ASTICS-2020) : Book of Abstracts, Kazan, 06–08 октября 2020 года. Kazan: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, 2020. P. 104–105. EDN SJEUJP.
5. Свецкий А.В. Искусственный интеллект в агропромышленном комплексе: проблемы правового регулирования и перспективы использования // Сельское хозяйство. 2025. № 1. С. 24–38. DOI: 10.7256/2453-8809.2025.1.73722. EDN XHOEBD.
6. Ibadullaev A., Babaev A., Chorshanbiev U., Kurbanov S., Elmuratova L. Determination of the influence of composition modifiers based on secondary polymer materials on the corrosion of the pipeline system // Universum: технические науки. 2024. No. 1-4(118). Pp. 32–36. DOI: 10.32743/UniTech.2024.118.1.16654. EDN ONYFNJ.
7. Рожков Е.А. Параметры и режимы работы оптико-электронной установки для сортировки семян пшеницы в селекционных центрах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2024. 174 с. EDN PJVFGR.
8. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Minina Yu.S. Effect of mechanical activation of reagents on synthesis of Li-Sm ferrite // ChemChemTech. 2024. Vol. 67, No. 3. Pp. 63–72. DOI 10.6060/ivkkt.20246703.6931. EDN QXCXZU.
9. Кудрявцев Н.Г., Фролов И.Н. Практика применения компьютерного зрения и элементов машинного обучения в учебных проектах. Горно-Алтайск : Библиотечно-издательский центр Горно-Алтайского государственного университета, 2022. 180 с. EDN QFYFET.
10. Fomicheva T.A., Serenko O.A. Effect of temperature on the mechanical properties of the highly filled composites based on polypropylene and ground rubber scrap // INEOS OPEN. 2022. Vol. 5,

№. 4. Pp. 107–112. DOI 10.32931/ю2220a. EDN OQJOBW.

11. Блескин Д.И. История развития машинного зрения // Матрица научного познания. 2023. № 11-1. С. 88–94. EDN YBTTKJ.

12. Зубарев Е.Е., Пиль Э.А. Анализ современных устройств машинного зрения и ориентации автомобиля // Альманах современной науки и образования. 2012. № 3. С. 61–62. EDN OUVTSR.

13. Миннеханов Б.И. Машинное зрение // Студенческий. 2019. № 26-3(70). С. 19–21. EDN CFHMJR.

14. Садриев Р.Р. Искусственный интеллект и машинное зрение // Диспетчеризация и управ-

ление в электроэнергетике : Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ, Казань, 08–10 ноября 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 604–606. EDN RTCUXA.

15. Плюхаев А.И. Подготовка обучающей выборки нейронной сетью для задач машинного зрения // ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА: ПРОБЛЕМЫ и ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ : сборник статей Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Пенза, 13 июня 2017 года. Том Часть 2. Пенза: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2017. С. 57–59. EDN YRZMLP.

Информация об авторах

Карелина Мария Юрьевна, доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин и теории механизмов». E-mail: karelinamu@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Акулов Алексей Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: a.akulov.98@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Подгорный Артем Велимирович, преподаватель кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: pavtxt@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Логанов Никита Витальевич, ассистент кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: nikita.loganov.2001@yandex.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Поступила 16.12.2025 г.

© Карелина М.Ю., Акулов А.А., Подгорный А.В., Логанов Н.В., 2026

Karelina M.Y., *Akulov A.A., Podgorny A.V., Loganov N.V.
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI)
*E-mail: a.akulov.98@mail.ru

RESISTANCE OF PERIPHERAL DEVICES OF VISION SYSTEMS TO THE APPLIED AGROCHEMICALS

Abstract. This article examines the physico-chemical degradation of the surfaces of technical vision systems used in the agro-industrial complex, as well as the reliability of computer vision systems operating in chemically aggressive environments. As autonomous agricultural machinery becomes increasingly dependent on optical data for navigation and crop monitoring, the reliability of camera interfaces under prolonged exposure to fertilizers, herbicides, and pesticides is becoming a critical engineering challenge. The study provides a detailed analysis of the interaction between the chemical components of widely used agrochemicals, with special attention paid to active ingredients, organic solvents and surfactants, as well as the housings of vision modules. The experimental basis includes a comparative assessment of the durability of materials of vision systems under controlled exposure to various concentrations of reagents. The main point of this study is the mechanisms of destruction of materials. The study correlated the duration of exposure and concentration of the reagent with quantitative indicators of optical characteristics, including loss of transmission in the visible and near-infrared spectra and an increase in surface roughness, as well as a chemical analysis of the interaction of reagents with materials of vision systems.

Keywords: precision agriculture, machine vision, chemical degradation, optical polymers, agrochemicals, sensor reliability.

REFERENCES

1. Dronina A.A., Zaripova R.S. Possible ways to improve the agro-industrial complex using end-to-end technologies [Vozmozhnye puti sovershenstvovaniya agropromyshlennogo kompleksa s ispol'zovaniem skvoznykh tekhnologij]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2022. No. 4(37). Pp. 238–242. EDN PHKORP. (rus)
2. Zakharenko V.A. Agrochemical aspects of chemical safety of pesticides [Agrokhimicheskie aspekty khimicheskoy bezopasnosti pestitsidov]. *Agricultural Chemistry*. 2022. No. 1. Pp. 50–57. DOI: 10.31857/S0002188122010112. EDN SQJYWY. (rus)
3. Akulov A. A., Omelchenko N. A., Taldykin, D. S., Ganzha N. M. Prospects and effectiveness of using machine vision systems in the agro-industrial complex of the Russian Federation [Perspektivy i effektivnost' primeneniya sistem mashinnogo zreniya v agropromyshlennom komplekse Rossijskoj Federacii]. ACTUAL problems of MODERN SOCIETY, SCIENCE and EDUCATION: collection of articles of the II International scientific-practical conference, Penza, August 20, 2025. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2025. Pp. 14–19. EDN RSFSOQ. (rus)
4. Antropova N.S., Ushakova O.V. Prospects for studying tetracycline group antibiotics in the process of their accumulation in soils and translocation into plants. V International Conference "Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety" (ASTICS-2020): Book of Abstracts, Kazan, October 06–08, 2020. Kazan: Federal Research Center for Chemical Physics named after N.N. Semenov of the Russian Academy of Sciences, 2020. Pp. 104–105. EDN SJEUJP.
5. Svetskij A.V. Artificial intelligence in the agro-industrial complex: problems of legal regulation and prospects of use [Iskusstvennyj intellekt v agropromyshlennom komplekse: problemy pravovogo regulirovaniya i perspektivy ispol'zovaniya]. *Sel'skoe khozyajstvo*. 2025. No. 1. Pp. 24–38. DOI 10.7256/2453-8809.2025.1.73722. EDN XHOEBD. (rus)
6. Ibadullaev A., Babaev A., Chorshanbiev U., Kurbanov S., Elmuratova L. Determination of the influence of composition modifiers based on secondary polymer materials on the corrosion of the pipeline system. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. 2024. No. 1-4(118). Pp. 32–36. DOI 10.32743/UniTech.2024.118.1.16654. EDN ONYFNJ.
7. Rozhkov E. A. Parameters and operating modes of an optoelectronic installation for sorting wheat seeds in breeding centers: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences [Parametry i rezhimy raboty optiko-elektronnoj ustanovki dlya sortirovki semyan pshenicy v selekcionnyh centrakh: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk]. 2024. 174 p. EDN PJVFGR. (rus)
8. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Minina Yu.S. Effect of mechanical activation of reagents on synthesis of Li-Sm ferrite. *ChemChemTech*. 2024. Vol. 67, No. 3. Pp. 63–72. DOI 10.6060/ivkkt.20246703.6931. EDN QXCXZU.
9. Kudryavtsev N.G., Frolov I.N. The practice of using computer vision and machine learning elements in educational projects [Praktika primeneniya komp'yuternogo zreniya i elementov mashinnogo obucheniya v uchebnykh proektakh]. Gorno-Altajsk: Bibliotechno-izdatel'skij centr Gorno-Altajskogo gosudarstvennogo universiteta, 2022. 180 p. EDN QFYFET. (rus)
10. Fomicheva T.A., Serenko O.A. Effect of temperature on the mechanical properties of the highly filled composites based on polypropylene and ground rubber scrap. *INEOS OPEN*. 2022. Vol. 5, No. 4. Pp. 107–112. DOI 10.32931/io2220a. EDN OQJOBW.
11. Bleskin D.I. History of the development of machine vision [Istoriya razvitiya mashinnogo zreniya]. *Matrica nauchnogo poznaniya*. 2023. No. 11-1. Pp. 88–94. EDN YBTTKJ. (rus)
12. Zubarev E.E., Pil' E.A. Analysis of modern devices of machine vision and vehicle orientation [Analiz sovremennykh ustrojstv mashinnogo zreniya i orientacii avtomobilya]. *Al'manakh sovremennoj nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 3. Pp. 61–62. EDN OUVTSR. (rus)
13. Minnekhanov B.I. Machine vision [Mashinnoe zrenie]. *Studencheskij*. 2019. No. 26-3(70). Pp. 19–21. EDN CFHMJR. (rus)
14. Sadriev R.R. Artificial intelligence and machine vision [Iskusstvennyj intellekt i mashinnoe zrenie]. *Dispatching and Control in Electric Power Industry: Materials of the International Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of KGEU, Kazan, November 08–10, 2023*. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2024. Pp. 604–606. EDN RTCUXA. (rus)
15. Plyukhaev A.I. Preparation of a training dataset by a neural network for machine vision tasks [Podgotovka obuchayushchej vyborke nejronnoj set'yu dlya zadach mashinnogo zreniya]. *TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY: PROBLEMS and PROSPECTS OF DEVELOPMENT: collection of articles of the International scientific and practical conference: in 2 parts, Penza, June 13, 2017*. Vol. Part 2. Penza: "Aeterna" Limited Liability Company, 2017. Pp. 57–59. EDN YRZMLP. (rus)

Information about the authors

Karelina, Maria Y., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor. E-mail: karelinamu@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Akulov, Alexey A. PhD. E-mail: a.akulov.98@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Podgorny, Artyom V. Lecturer. E-mail: pavtxt@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Loganov, Nikita V. Assistant of the Department, E-mail: nikita.loganov.2001@yandex.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Received 16.12.2025

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Акулов А.А., Подгорный А.В., Логанов Н.В. Стойкость периферийных устройств систем технического зрения к применяемым агрохимикатам // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123

For citation:

Karelina M.Y., Akulov A.A., Podgorny A.V., Loganov N.V. Resistance of peripheral devices of vision systems to the applied agrochemicals. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132

^{1,*}Бондаренко Ю.А., ¹Лозовая С.Ю., ¹Шрубченко И.В., ²Явурик О.В., ¹Баранов Д.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Белгородский государственный национальный исследовательский университет

*E-mail: kdsm2002@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЦАПФЫ ОПОРНОГО УЗЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА

Аннотация. Выполнен анализ основных характеристик механических свойств твердых тел - деформаций и напряжений, возникающих при влиянии температуры на внутреннюю и внешнюю рабочие поверхности цапфы опорного узла шаровой трубной мельницы. Рассмотрены термические свойства цапфы, которые характеризуют поведение этой детали при действии тепловых полей. Установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния цапфы опорного узла оказывает влияние на работоспособность мельничного агрегата при его эксплуатации, следовательно, данная задача важна в плане повышения эффективности производства материалов. С помощью численных методов изучен процесс деформации цапфы опорного узла, сталь 35Л ГОСТ 977-88, с учетом варьирования температурного поля в зоне сопряжения, а также исследованы напряжения сопрягаемых поверхностей. Приведены уравнения, описывающие изменения напряжений в различных направлениях при принятом варьировании параметров температуры внешней и внутренней поверхности цапфы. Представлены графические результаты моделирования. Установлено, что на цапфу оказывают воздействия силы тяжести вращающегося барабана с мелющими телами и загрузкой материала, а также изменяется температура в рабочей зоне, и ее состояние характеризуется как сложное напряженно-деформированное, эквивалентные напряжения и деформации определялись с использованием интенсивности. Проведены вычисления интенсивности деформаций по разности главных деформаций.

Ключевые слова: шаровая трубная мельница, цапфа опорного узла, баббитовый вкладыш, напряжения, деформации, численное моделирование, температура.

Введение. Шаровые трубные мельницы, ГОСТ 10141-91, представляют собой вращающиеся цилиндрические аппараты, частично заполненные мелющими телами (шарами из стали или чугуна), являются универсальным и эффективным оборудованием для тонкого измельчения в машиностроительной, горной, строительной, химической и других отраслях промышленности.

Принцип работы заключается в следующем: вращающийся барабан с мелющими шарами и загружаемым материалом создает условия для измельчения за счет нескольких механизмов – ударов падающих шаров (водопадный способ), а также трения между шарами и самим материалом (каскадный способ). При вращении мельницы шары поднимаются по внутренним стенкам барабана до определенного угла и затем падают, дробя и истирая материал [1–5].

К основным дефектам и факторам, снижающим работоспособность опорных узлов мельниц можно отнести различные механические повреждения сопрягаемой рабочей наружной поверхности цапфы: выбоины, риски, задиры, забоины, царапины, вмятины, а также износ торцевых поверхностей. В связи с возможным отклонением от горизонтального положения трубной мельницы, с появлением зазора во фланцевом соединении между барабаном трубной мельницы и

крышкой цапфового узла или искривлением оси корпуса мельницы, может возникнуть повышенное биение цапфы [6–8].

В процессе работы в смазку попадают различные включения, наличие которых приводит к снижению ее эксплуатационных характеристик и повышению рабочих температур подшипникового блока, в последствии возникают повышенные вибрации, напряжения и деформации, являющиеся факторами неравномерного износа сопрягаемых поверхностей цапфы и баббитового вкладыша подшипника, что приводит к потере работоспособности цапфы и остановке шаровой трубной мельницы для проведения ремонтных работ.

Срок службы мельниц до капитального ремонта должен составлять не менее 4,5 лет, при коэффициенте технического использования – 0,85.

Производительность шаровых трубных агрегатов характеризует много факторов. В таблице 1 приведена номинальная производительность цементных трубных мельниц типа МЦ, которые предназначены для помола цементного клинкера с добавками в производстве самого цемента.

Таблица 1

Номинальная производительность, т/ч (пред. откл. ±15 %) цементных мельниц

Наименование основных параметров и размеров	Нормы по типоразмерам					
	2,0×10,5	2,6×13,0	3,2×15,0	4,0×13,5	3,0×14,0	5,0×16,5
Тип цементной мельницы	2,0×10,5	2,6×13,0	3,2×15,0	4,0×13,5	3,0×14,0	5,0×16,5
Номинальная производительность, т/ч	10,0	27	50,0	100,0	43,0	175,0

Методология. Проблема заключается в том, что в процессе эксплуатации шаровых трубных мельниц происходит износ опорных подшипниковых узлов, причем в большинстве случаев это неравномерный износ вкладышей подшипников скольжения, которые изготовлены из баббита. Для определения основных причин нарушения работоспособности мельниц связанных с износом баббитовых вкладышей были проведены статистические исследования на предприятиях промышленности строительных материалов, цементной промышленности. Необходимо минимизировать потери, связанные с вынужденными простоями оборудования в ремонте. В соответствии с этим следует определить какие основные факторы влияют на износ баббитовых вкладышей, установить наиболее весомые причины, приводящие к появлению напряжений и деформаций, влекущих за собой повышение удельных нагрузок поверхности сопряжения цапф опорного подшипникового узла. При этом целесообразным будет использование численного моделирования напряжений и деформаций цапфы с учетом температурного поля, математического пакета для аналитических вычислений Maple, с варьированием параметров (температуры внутренней и внешней поверхностей цапфы опорного блока) в заданных границах.

Основная часть. Износ сопрягаемых поверхностей цапфы и баббитового вкладыша в большинстве случаев связан с повышенными температурами в зоне контакта, результатом которых является неуравновешенность и вибрации, приводящие к появлению напряжений, деформаций и повышенным удельным нагрузкам (рис. 1). Трансформация напряженно-деформированного состояния цапфы опорных подшипниковых узлов зависит от температур ее внутренней и внешней поверхностей. Анализ изменения напряжений и деформаций при варьировании температурных параметров цапфы цементной мельницы проводится численным методом, поэтому для исследований следует задать значения постоянных параметров цапфы. Изменение напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы действительно зависит от температурных параметров как внутренней, так и внешней поверхностей цапфы. Температура влияет на механические свойства материала цапфы, включая

упругопластические характеристики, и, соответственно, на величину и распределение напряжений и деформаций.

Численный анализ изменения напряженно-деформированного состояния при различных температурах проводится с использованием заданных значений постоянных и параметров материала цапфы. В таких расчетах учитываются тепловые нагрузки, температурные градиенты, а также тепловое расширение и связанные с этим деформации и внутренние напряжения. Это позволяет комплексно оценить влияние изменения температуры на надежность и долговечность цапфы.

При этом особо важна корректная постановка граничных условий и учетывание теплового режима шаровой мельницы, где температура внутренней среды может достигать высоких значений, влияя на нагрев и деформацию конструктивных элементов, включая цапфы. Методы численного моделирования учитывают указанные параметры, применяя полную систему уравнений равновесия и законов деформирования для цапфы в реальных условиях работы мельницы.

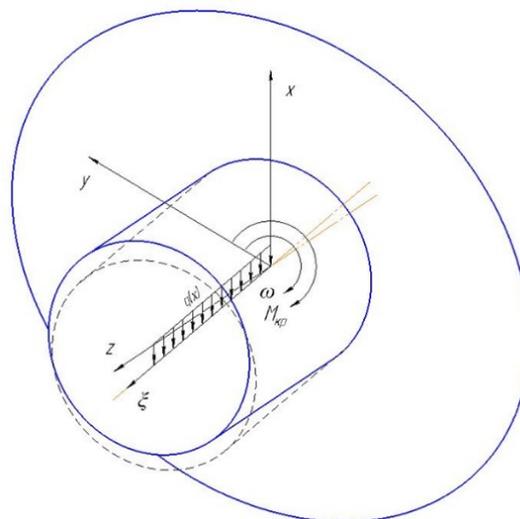


Рис. 1. Расчетная схема изгиба и вращения цапфы

Напряжения рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в азимутальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы определяется по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\alpha E (T_{R_2} - T_{R_1})}{1 - \nu} \left[\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{2 \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (1)$$

где, α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости, МПа; ν – коэффициент Пуассона; T_{R_1} и T_{R_2} – температура внутренней и внешней поверхности цапфы соответственно, $^\circ\text{C}$; R_1 и R_2 – радиусы внутренней и внешней поверхности цапфы соответственно, м.

Напряжения внешней поверхности в аксиальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы определяются по формуле:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\alpha}{2(1-\nu)} \left[\frac{(1-3\nu)(R_2^2 T_{R_2} - R_1^2 T_{R_1}) - (1+\nu)(R_1^2(T_{R_1} - T_{R_2}) + T_{R_2}(R_2^2 - R_1^2))}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(1-\nu)(T_{R_2} - T_{R_1})}{\ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (3)$$

Деформацию рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в радиальном

$$\varepsilon_r = \frac{\alpha}{2(1-\nu)} \left[\frac{(1-3\nu)(R_2^2 T_{R_2} - R_1^2 T_{R_1}) + (1+\nu)T_{R_2}(R_2^2 - R_1^2)}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{2\nu(T_{R_2} - T_{R_1})}{\ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] \quad (4)$$

Деформация рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в аксиальном направлении вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_z = \frac{\alpha \left[(T_{R_2} - T_{R_1})(R_2^2 - R_1^2) + 2(R_1^2 T_{R_1} - R_2^2 T_{R_2}) \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right]}{2(R_2^2 - R_1^2) \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} + \varepsilon_{z_0} \quad (5)$$

Математические зависимости (1–5) позволяют рассчитать значения напряженно-деформированного состояния внешней рабочей сопрягаемой поверхности цапфы.

Была исследована шаровая трубная цементная мельница диаметром 3,2 м и длиной 15 м с геометрическими параметрами цапфы опорного подшипникового узла диаметром 1,4 м и длиной 0,92 м. Рассмотренная цапфа имеет радиусы внутренней поверхности $R_1 = 0,575$ м и внешней поверхности $R_2 = 0,7$ м.

Цапфа шаровой трубной мельницы может выйти из строя в процессе ее эксплуатации из-за развития трещин, вызванными дефектами литья, износа внутренней поверхности и других факторов [9–12].

Цапфа относится к деталям, работающим под действием средних статических и динамических нагрузок. В соответствии с ГОСТ 977-88 для изготовления цапф в качестве материала используется сталь 35Л. По классификации эта сталь относится к нелегированной стали для отливок, для дальнейших расчетов примем следующие значения: коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, модуль упругости $E = 2,01 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент линейного расширения $\alpha = 12 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Для определения напряжений и деформаций требуется задать температуры внутренней и внешней сопрягаемой с баббитовым вкладышем поверхностей цапфы опорного узла. Температура подаваемого цементного клинкера и доба-

$$\sigma_z = \frac{\alpha E (T_{R_2} - T_{R_1})}{1-\nu} \left[\frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{1}{2 \ln \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \right] + \sigma_{z_0} \quad (2)$$

Деформацию рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы в азимутальном направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы можно определить по формуле:

направлении при наружном R_2 радиусе цапфы мельницы можно определить по формуле:

вок оказывает влияние на температуру внутренней поверхности цапфы. При определении температуры на внутренней поверхности загрузочной цапфы, следует учесть, что температура поступающего в цапфу шаровой трубной мельницы цементного клинкера и добавок находится в интервале $T_{R_1} = 70 \dots 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, при определении температуры на внутренней поверхности разгрузочной цапфы, учитываем, что температура подающегося цементного клинкера и добавок находится в интервале $T_{R_1} = 100 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

При мониторинге температуры внешней поверхности цапфы опорного узла мельницы используются термодары, размещенные у галтелей сопрягаемой рабочей поверхности цапфы (Рис. 2).

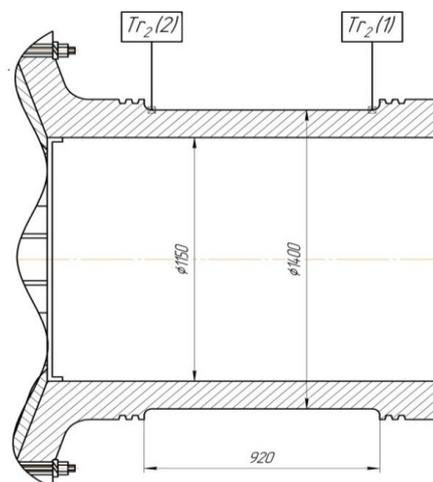


Рис. 2. Мониторинг температуры сопрягаемой рабочей поверхности цапфы

Температура сопрягаемой рабочей поверхности загрузочной и разгрузочной цапф колеблется при измерении ее в продольном направлении вдоль оси. Температура, измеряемая для сопрягаемой рабочей поверхности загрузочной цапфы подшипникового опорного узла, варьируется в интервалах $T_{R_2}(1) = 30 \dots 40^\circ\text{C}$, $T_{R_2}(2) = 40 \dots 45^\circ\text{C}$. Температура, измеренная на сопрягаемой рабочей поверхности разгрузочной цапфы, находится в пределах $T_{R_2}(1) = 40 \dots 50^\circ\text{C}$, $T_{R_2}(2) = 50 \dots 65^\circ\text{C}$.

Для решения уравнений (1-4) применяли математический пакет для аналитических вычислений Maple, при этом изменение параметров варьирования (температуры внутренней и внешней поверхностей цапфы опорного блока находилось в границах: $T_{R_1} = 70 \dots 150^\circ\text{C}$, $T_{R_2} = 30 \dots 70^\circ\text{C}$.

Результат численного моделирования напряжений и деформаций цапфы с учетом температурного поля в соответствии с уравнениями (1-4), представлен в виде графических зависимостей на рисунках 3 – 7.

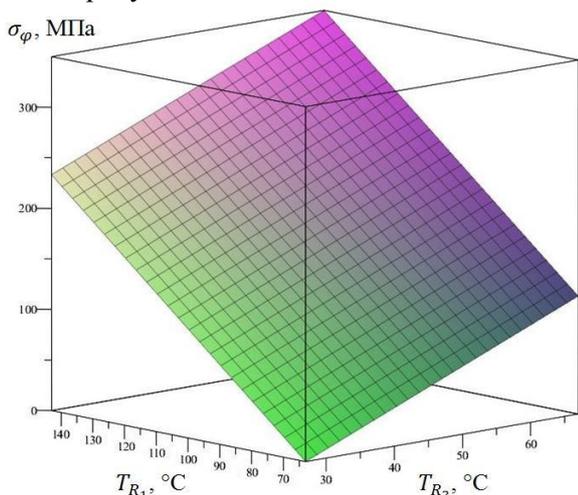


Рис. 3. Изменение напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы опорного узла при изменениях температуры внешней и внутренней поверхности в азимутальном направлении

Анализ графических зависимостей изменения напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы опорного узла показывает, что напряжения в аксиальном направлении немного превышают напряжения в азимутальном направлении. Это связано с дополнительной нагрузкой силы тяжести, которая действует именно в аксиальном направлении и составляет около 0,1% от общего напряжения. В то время как азимутальные напряжения формируются главным образом под воздействием сил вращения и трения.

Такое распределение напряжений обусловлено тем, что в аксиальном направлении цапфа воспринимает создаваемую гравитационную нагрузку, усиливающую изгибающие моменты и

вызывающую более высокие напряжения, в то время как в азимутальном направлении преобладают нагрузки, связанные с кручением и касательными силами.

Таким образом, при проектировании и анализе конструкции цапф шаровых мельниц необходимо уделять внимание как аксиальным, так и азимутальным напряжениям, особенно учитывая дополнительные нагрузки силы тяжести, что влияет на долговечность и надежность опорного узла.

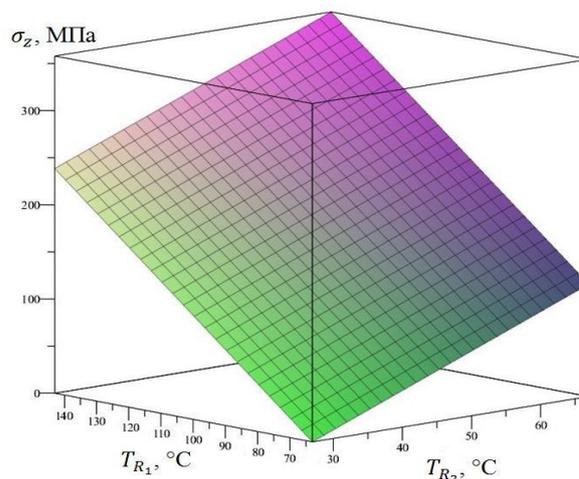


Рис. 4. Изменение напряжений внешней сопрягаемой поверхности цапфы при изменении температур внешней и внутренней поверхности в аксиальном направлении

Анализ графиков показывает, что напряжения на внешней рабочей поверхности цапфы шаровой мельницы действительно увеличиваются с повышением температуры, как на внешней, так и на внутренней поверхности контакта цапфы. Это связано с тем, что при повышении температуры меняются физико-механические характеристики материала цапфы, увеличивается тепловое расширение, что в совокупности с действием сил вращения и силы тяжести усугубляет напряженно-деформированное состояние.

Повышение температуры приводит к росту внутренних напряжений и деформаций, что способствует увеличению удельных нагрузок на рабочую поверхность. Такой режим нагрузки способствует ускоренному износу, повышению вибраций и неустойчивости, что негативно влияет на долговечность и надежность опорных подшипников и всей мельницы.

Для нахождения эквивалентных напряжений и деформаций внешней сопрягаемой поверхности цапфы шаровой трубной мельницы целесообразно использовать интенсивность напряжения. Это обусловлено тем, что напряженно-деформированное состояние цапфы формируется под воздействием комплексного сочетания сил:

силы вращения, силы тяжести и изменяющейся температуры.

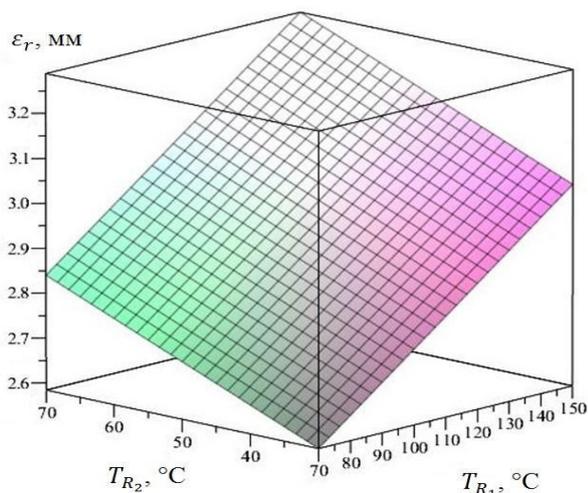


Рис. 5. Деформация внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температуры в радиальном направлении внешней и внутренней поверхности

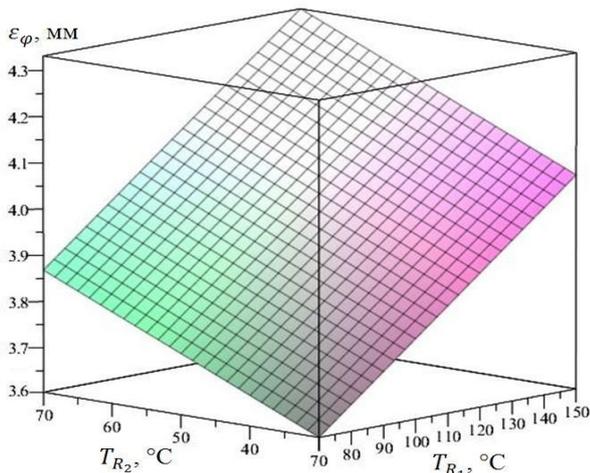


Рис. 6. Изменение деформации внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температур в азимутальном направлении внешней и внутренней поверхности

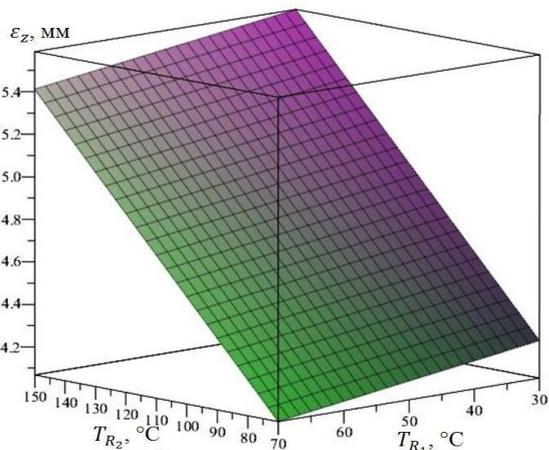


Рис. 7. Деформация внешней поверхности цапфы опорного узла при изменениях температур в аксиальном направлении внешней и внутренней поверхности

Интенсивность напряжения позволяет учесть все виды напряжений, возникающих в материале цапфы (в том числе нормальные и касательные), и получить единую величину, характеризующую степень нагружения и риск возникновения пластических деформаций или разрушений. Применение интенсивности напряжения в расчетах базируется на комплексной математической модели, включающей баланс сил, уравнения деформирования и температурные эффекты.

Таким образом, использование интенсивности напряжения как базового параметра при расчетах напряженно-деформированного состояния позволяет адекватно оценить механическое состояние цапфы, принять меры по предотвращению возможных повреждений и оптимизировать режимы эксплуатации и техническое обслуживание мельницы. Для определения интенсивности напряжения воспользуемся выражением [13–18], согласно критерию Мора:

$$\sigma_i = \lambda_1 \sigma_z + \lambda_2 \sigma_\varphi \quad (6)$$

где λ_1, λ_2 – постоянные материала.

Вводя условия кручения $\sigma_z = \tau_{-1}, \sigma_\varphi = 0$, при изгибе $\sigma_z = 0, \sigma_\varphi = \sigma_{-1}$, (где τ_{-1} – предел прочности при кручении; σ_{-1} – предел прочности при изгибе) в формулу (6), получим:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \lambda_1 \tau_{-1}; \sigma_{\text{ЭКВ}} = \lambda_2 \sigma_{-1} = \tau_{-1} \quad (7)$$

Определим λ_1, λ_2 (постоянные материала), используя (7):

$$\lambda_1 = 1, \lambda_2 = \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} \quad (8)$$

Тогда математическую зависимость (6) с использованием формулы (8), можно представить:

$$\sigma_i = \sigma_z + \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} \sigma_\varphi \quad (9)$$

или

$$\sigma_i = \sigma_z + \chi \sigma_\varphi \quad (10)$$

где $\chi = \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}}$.

Тогда интенсивность деформаций определяется из разности сумм квадратов деформаций [19–22]:

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2} \quad (11)$$

Выводы. Износ рабочих поверхностей цапф опорных подшипниковых узлов шаровых трубных мельниц обусловлен высокими температурами, что ведет к неуравновешенности и вибрациям. Вибрации, возникающие под воздействием высоких температур, усиливают напряжения и деформации, тем самым увеличивая удельные нагрузки на поверхности цапф. Это способствует

ускоренному износу, снижая срок службы опорных подшипников и всей мельницы.

Температурное воздействие влияет на внутренние и внешние поверхности цапфы, изменяя напряженно-деформированное состояние. Применение численных методов позволяет исследовать это влияние, моделируя колебания температур и вычисляя распределение напряжений и деформаций в трех направлениях на рабочей сопрягаемой поверхности цапфы цементной мельницы. Получены математические зависимости для оценки параметров напряжений и деформаций с учетом температурного поля, а также формулы для определения интенсивности напряжений.

Графические зависимости, построенные на основе этих расчетов, помогут визуализировать изменения напряжений и деформаций под воздействием температур, что важно для прогноза работоспособности и предотвращения преждевременного износа цапф в условиях эксплуатации с высоким тепловым режимом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банит Ф.Г., Несвежский О.А. Механическое оборудование цементных заводов. М., «Машиностроение», 1975. 318с.
2. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., «Высшая школа», 1971. 382с.
3. Бауман В.А. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. М., «Машиностроение», 1981. 326с.
4. Гологорский Е.Г., Доценко А.И., Ильин А.С. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии. М.: Архитектура, 2006. 503 с.
5. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Основные процессы в производстве строительных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. 550 с.
6. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А., Погонин А.А., Схиртладзе А.Г., Санина Т.М. Бездемонтажное восстановление крупногабаритных агрегатов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. №11. С. 11–14.
7. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 122–127. DOI: 10.12737/22353
8. Бестужева О.В., Бондаренко Ю.А., Баранов Д.С., Романович А.А. Исследование ремонтного восстановления поверхностей вращения различной конфигурации большого диаметра // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №12. С. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124
9. Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О. В. Математическое описание напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы под действием силы тяжести и вращения // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. №3. С. 128-133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599
10. Федоренко Т.М., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Восстановление работоспособности цапф помольных мельниц с применением переносного станка // Технология машиностроения. 2009. № 3. С. 20–21. DOI: 10.12737/article_59a93b0ac85999.41172542
11. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Определение рациональных параметров ротационной обработки поверхностей вращения при восстановлении крупногабаритных деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 121–125. DOI: 10.12737/22647
12. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Санина Т.М. Влияние колебаний валов на точность обработки на нестационарных станках // XI Международная конференция по машиностроению г. Томск, Россия 04-06 2017г. С. 2–7.
13. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Москва, 2001. 920 с.
14. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Москва, 1975. 833 с.
15. Бояршинов М.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния вращающегося длинного цилиндра // Вестник ПНИПУ. 2013. №1. С. 25–38.
16. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
17. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев, 1976. 416 с
18. Светлицкий В.А. Строительная механика машин. Механика стержней. В 2 томах. М.: Физматлит, 2009. 408 с.
19. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М.: Инфра-М, 2011. 640 с.
20. Дудяк А.И., Сахнович Т.А. Прикладная теория упругости. М.: Издательство Гревцова, 2010. 164 с.
21. Бардзокас Д.И., Фильштинский Л.А., Фильштинский М.Л. Актуальные проблемы свя-

занных физических полей в деформируемых телах. Математический аппарат физических и инженерных наук. Том 1. М.: Москва, 2010. 864 с.

22. Тимошенко С.П., Дж. Гульер. Теория упругости. Москва, 1975. 560 с.

Информация об авторах

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Шрубченко Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Явурик Ольга Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.05.2025 г.

© Бондаренко Ю.А., Лозовая С.Ю., Шрубченко И.В., Явурик О.В., Баранов Д.С., 2026

^{1,}Bondarenko Yu.A., ¹Lozovaya S.Yu., ¹Shrubchenko I.V., ²Yavurik O.V., ¹Baranov D.S.*

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

²Belgorod State National Research University

**E-mail: kds2002@mail.ru*

STUDY OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF THE TRUNNION OF THE SUPPORT UNIT USING THE NUMERICAL METHOD

Abstract. *The article presents the analysis of the main characteristics of mechanical properties of solids – deformations and stresses arising under the influence of temperature on the internal and external working surfaces of the journal of the support unit of a ball tube mill. The article considers the thermal properties of the journal, which characterize the behavior of this part under the action of thermal fields. It is established that a change in the stress-strain state of the journal of the support unit affects the performance of the mill unit during its operation, therefore, this problem is important in terms of increasing the efficiency of material production. Using numerical methods, the deformation process of the journal of the support unit, steel 35L GOST 977-88, was studied taking into account the variation of the temperature field in the mating zone, and the stresses of the mating surfaces were investigated. Equations are given that describe stress changes in different directions with the adopted variation of the temperature parameters of the external and internal surfaces of the journal. Graphical results of the modeling are presented. It was found that the journal is affected by the gravity forces of the rotating drum with grinding bodies and material loading, and the temperature in the working area changes, and its state is characterized as complex stress-strain, equivalent stresses and strains were determined using intensity. Calculations of the strain intensity were performed based on the difference in the main strains.*

Keywords: *ball tube mill, journal of support unit, babbitt insert, stress, deformation, numerical modeling, temperature.*

REFERENCES

1. Banit F.G., Nesvezhsky O.A. Mechanical equipment of cement plants. [Mekhanicheskoye oborudovaniye tsementnykh zavodov]. Moscow, "Mashinostroenie", 1975. 318 p. (rus)
2. Sapozhnikov M.Ya. Mechanical equipment of enterprises producing building materials, products

and structures. [Mekhanicheskoye oborudovaniye predpriyatiy stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktсий]. Moscow, "Higher School", 1971. 382 p. (rus)

3. Bauman V.A. Mechanical equipment of enterprises producing building materials, products and structures. [Mekhanicheskoye oborudovaniye

predpriyatii stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy]. Moscow, "Mashinostroenie", 1981. 326 p. (rus)

4. Gologorsky E.G., Dotsenko A.I., Ilyin A.S. Operation and repair of equipment at enterprises of the construction industry. [Ekspluatatsiya i remont oborudovaniya predpriyatij strojindustrii]. M.: Architecture, 2006. 503 p. (rus)

5. Bogdanov V.S., Ilyin A.S., Semikopenko I. A. Basic processes in production of building materials. [Osnovnyye protsessy v proizvodstve stroitel'nykh materialov] Belgorod: Publishing house of BSTU named after V. G. Shukhov, 2008. 550 p. (rus)

6. Bondarenko Yu.A., Fedorenko M.A., Pogonin A.A., Skhirtladze A.G., Sanina T.M. Non-dismantling restoration of large-sized units [Bezdemontazhnoe vosstanovlenie krupnogabaritnykh agregatov]. Repair, restoration, modernization. 2009. No.11. Pp. 11–14. (rus)

7. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Experimental study of restoration of the surface of revolution of large-sized parts of industrial equipment [Experimental'nyye issledovaniya vosstanovleniya poverkhnostey vrascheniya krupnykh detaley promyshlennogo oborudovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 122–127. (rus)

8. Bestuzheva O.V., Bondarenko Yu.A., Baranov D.S., Romanovich A.A. Study of repair restoration of surfaces of revolution of various configurations of large diameter [Issledovanie remontnogo vosstanovleniya poverkhnostej vrashcheniya razlichnoj konfiguracii bol'shogo diametra]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 116–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124 (rus)

9. Bondarenko Yu.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. Mathematical description of the stress-strain state of a ball mill journal under the action of gravity and rotation [Matematicheskoye opisaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osi sharovoy mel'nitsy pod deystviyem sily tyazhesti i vrashcheniya]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2019. No. 3. Pp. 128–133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599 (rus)

10. Fedorenko T.M., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu. A. Restoration of the operability of grinding mill journals using a portable machine [Vosstanovlenie pabotosposobnosti capf pomol'nykh mel'nic s ppimeneniem pepenosnogo stanka]. Technology of mechanical engineering. 2009. No. 3. Pp. 20–21. DOI: 10.12737/article_59a93b0ac85999.41172542 (rus)

11. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Determination of rational parameters of rotary machining of surfaces of revolution

during restoration of large-sized parts [Opreделение racional'nykh parametrov rotacionnoj obrabotki poverkhnostej vrashcheniya pri vosstanovlenii krupnogabaritnykh detalej]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 121–125. (rus)

12. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A., Sanina T.M. Influence of shaft vibrations on the accuracy of machining on non-stationary machines [Vliyanie kolebanij valov na tochnost' obrabotki na nestacionarnykh stankah]. XI International Conference on Mechanical Engineering Tomsk, Russia 04-06 2017. Pp. 2–7. (rus)

13. Anurev V.I. Handbook of the mechanical engineer. [Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya]. Moscow, 2001. 920 p. (rus)

14. Filin A. P. Applied mechanics of a solid deformable body. [Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruемого tela]. Moscow, 1975. 833 p. (rus)

15. Boyarshinov M.G. Evaluation of the stress-strain state of a rotating long cylinder [Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vrashchayushchegosya dlinnogo tsilindra]. Bulletin of PNIPU. 2013. No. 1. Pp. 25–38. (rus)

16. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Strength calculation of machine parts. [Raschet prochnosti detaley mashin]. Moscow: Mechanical Engineering, 1979. 702 p. (rus)

17. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformation and strength of materials under complex stress state. [Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii]. Kyiv, 1976. 416 p. (rus)

18. Svetlitsky V.A. Structural mechanics of machines. Mechanics of rods. In 2 volumes. [Stroitel'naya mekhanika mashin. Mekhanika sterzhney. V 2-kh tomakh]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 408 p. (rus)

19. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Strength of materials with the basics of elasticity and plasticity theory. [Soprotivleniye materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti]. M.: Infra-M, 2011. 640 p. (rus)

20. Dudyak A.I., Sakhnovich T.A. Applied Theory of Elasticity. [Prikladnaya teoriya uprugosti]. M.: Grevtsov Publishing House, 2010. 164 p. (rus)

21. Bardzokas D.I., Filshinsky L.A., Filshinsky M.L. Actual Problems of Coupled Physical Fields in Deformable Bodies. Mathematical Apparatus of Physical and Engineering Sciences. [Aktual'nye problemy svyazannykh fizicheskikh polej v deformiruemykh telakh. Matematicheskij apparat fizicheskikh i inzhenernykh nauk]. Vol. 1. M.: Moscow, 2010. 864 p. (rus)

22. Timoshenko S.P., Gullier J. Theory of Elasticity. [Teoriya uprugosti]. Moscow, 1975. 560 p. (rus)

Information about the authors

Yulia, Anatolyevna B. DSc. E-mail: kdsm2002@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Lozovaya, Svetlana Y. DSc. E-mail: kdsm2002@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia

Olga, Vasilyevna Y. PhD. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia.

Shrubchenko, Ivan V. DSc. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46

Baranov, Denis S. Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Received 21.05.2025

Для цитирования:

Бондаренко Ю.А., Лозовая С.Ю., Шрубченко И.В., Явурик О.В., Баранов Д.С. Изучение напряжений и деформаций цапфы опорного узла с применением численного метода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 124–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132

For citation:

Bondarenko Yu.A., Lozovaya S.Yu., Shrubchenko I.V., Yavurik O.V., Baranov D.S. Study of stresses and deformations of the trunnion of the support unit using the numerical method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 124–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-124-132