

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

5

2025

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

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

№ 5, 2025 год

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

Vol. 5. 2025

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова

научно-теоретический журнал

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

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

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

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

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации: ПИ № ФС77-80909 от 21 апреля 2021 г.
Учредитель/Издатель:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46
Адрес редакции:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, БГТУ им. В.Г. Шухова, оф. 522 Гк
Адрес типографии:	Россия, 308012, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, Издательский центр БГТУ им. В.Г. Шухова
Тел:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Официальный сайт журнала:	https://bulletinbstu.editorum.ru
Подписка и распространение	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. (+12) Цена свободная.
Подписан в печать	12.05.2025
Выход в свет	22.05.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 17,21. Уч.-изд. л. 18,50. Тираж 35 экз. Заказ № 61

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

Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov

scientific and theoretical journal

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

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

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

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

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

Founder / Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov” (BSTU named after V.G. Shukhov) 46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation
Editorial office address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation BSTU named after V.G. Shukhov, of. 522
Printing house address:	46 Kostyukova street, Belgorod, 308012, Russian Federation Publishing Center, BSTU named after V.G. Shukhov
Tel:	+7 (4722) 30-99-77
E-mail:	VESTNIK@intbel.ru
Official website of the journal	https://bulletinbstu.editorum.ru
Distribution	The journal is distributed free of charge in the public domain. Free price
Signed for printing:	12.05.2025

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Victor S. Meshcherin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical University of Dresden (TU Dresden), Director of the Institute of Building Materials and head of the department of building materials (Germany, Dresden).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Aleksandr G. Yur'yev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

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

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю.

ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ КВАРЦА НА ДЕГРАДАЦИЮ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ 8

Тараненко Д.В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕН ЗА СЧЁТ ВКЛЮЧЕНИЯ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ 18

Спирин П.П.

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ ВЫСОКОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ) 30

Перькова М.В., Грачева А.А., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю.

ВЛИЯНИЕ ГРАДООБРАЗУЮЩЕЙ БАЗЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ Г. УЛЬЯНОВСКА 45

Арслан М.И., Качемцева Л.В.

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОВЕТСКИХ РАБОЧИХ ПОСЕЛКОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1930-Х ГОДАХ (НА ПРИМЕРЕ СОЦГОРОДКА Г. ВАЛУЙКИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ) 60

Жданова И.В., Кузнецова А.А., Ненашева А.А.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДЕТСКИХ БИБЛИОТЕК 73

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О.

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ 83

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Латышев С.С., Маслов А.С., Кислицын А.Е., Четвериков Б.С.

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОДНОВАЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ 92

Вагазова Д.Д., Орефьева К.К., Тляшева Р.Р.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА В ПРОЦЕССЕ РУЛОНИРОВАНИЯ 109

Шестакова Е.В.

О РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА 118

Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ ДРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТКРЫТОЙ ПЛАТФОРМЫ GYM-PYBULLET-DRONES 137

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Tolypina N.M., Rakhimbaev S.M., Chashin D.Y.

THE INFLUENCE OF QUARTZ PARTICLE SIZE ON THE DEGRADATION
OF CEMENT STONE UNDER HIGH TEMPERATURE AND HUMIDITY 8

Taranenko D.V.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF WALLS BY INCLUDING PHASE
CHANGE MATERIALS IN THEIR STRUCTURE 18

Spirin P.P.

URBAN DEVELOPMENT OF TERRITORIES WITH HIGH ENVIRONMENTAL
RESPONSIBILITY (USING THE EXAMPLE OF THE ALTAI REPUBLIC) 30

Perkova M.V., Gracheva A.A., Ladik E.I., Drebezgova M.Yu.

INFLUENCE OF THE CITY-FORMING BASE ON THE SPATIAL DEVELOPMENT
OF ULYANOVSK 45

Arslan M.I., Kachemtseva L.V.

URBAN PLANNING PECULIARITIES OF REALIZATION OF THE PRINCIPLES
OF FORMATION OF SOVIET WORKING SETTLEMENTS ON THE TERRITORY
OF BELGOROD REGION IN 1930 (ON THE EXAMPLE OF THE SOCIAL TOWN
OF VALUIKI, BELGOROD REGION) 60

Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A., Nenasheva A.A.

MODERN APPROACHES TO DESIGNING CHILDREN'S LIBRARIES 73

CHEMICAL TECHNOLOGY

Goloviznina T.Y., Erygina A.O.

GRANULOMETRIC COMPOSITION OF CEMENT AS A METHOD
OF CONTROLLING CEMENT STONE PROPERTIES 83

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

**Gerasimov M.D., Lyubimyi N.S., Latyshev S.S., Maslov A.S., Kislitsyn A.E.,
Chetverikov B.S.**

ANALYSIS AND PROSPECTS OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT
OF SMALL-SIZED SINGLE-SHAFT VIBRATORY ROLLERS 92

Vagazova D.D., Orefyeva K.K., Tlyasheva R.R.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE TANK WALL DURING
THE ROLLING PROCESS 109

Shestakova E.V.

ABOUT DIFFERENT APPROACHES TO USING MILLING TOOLS 118

Duyun I.A., Duyun T.A., Rybak L.A.

MODELING THE DYNAMICS OF A DRONE GROUP USING
THE OPEN GYM-PYBULLET-DRONES PLATFORM 137

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., *Чашин Д.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: dmitriychashin11@gmail.com

ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ КВАРЦА НА ДЕГРАДАЦИЮ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Аннотация. Статья посвящена изучению влияния кварцевых заполнителей и наполнителей на термическую стойкость бетона. На основе экспериментальных данных показано, что кинетика твердения образцов бетона на основе кварца различной крупности в воде при 80 °С существенно отличается от твердения в нормальных условиях (20 °С). Коэффициент термостойкости образцов с ростом крупности частиц кварца в ряду 0–0,16 мм – 0,16–0,63 мм – 0,63–2,5 мм изменялся, соответственно, 1,15–1,40–0,84 через 12 мес испытаний. Установлено по изменению скорости прохождения ультразвука в исследуемых образцах, что на мелком кварцевом песке происходит формирование структуры, наиболее устойчивой при воздействии повышенной тепловой и влажностной нагрузок, что дает возможность значительно снизить интенсивность термической коррозии. Образцы бетона с крупным кварцем демонстрировали постепенную деградацию, а с тонкодисперсным кварцем – тенденцию к быстрому разрушению. Причиной деструкции в условиях термической коррозии являются процессы рекристаллизации гидратных фаз, сопровождающиеся растворением малоразмерных частиц гидратных новообразований с формированием более крупных и образованием α -гидрата двухкальциевого силиката, обладающего плохими вяжущими свойствами.

Ключевые слова: термическая коррозия, цементный камень, деградация, микроструктура, гидросиликаты, прочность.

Введение. Повышение температуры окружающей среды при одновременном воздействии влажности, близкой к 100 %-й, оказывает значительное влияние на физико-механические свойства и долговечность бетона, что обусловлено изменением структуры, пористости и фазового состава цементной матрицы. При этом происходит ухудшение прочностных показателей, снижение надежности и устойчивости изделий и конструкций [1–5]. Подобные условия наблюдаются при взаимодействии бетонных изделий с горячей водой в градирнях тепловых и атомных электростанций, используемых в оборотных системах водоснабжения и выполняющих функции тепло-массообменных устройств. При охлаждении воды путем распыления и непосредственного контакта с воздухом, происходит значительное воздействие на эксплуатационные свойства бетона [6–9]. На практике встречаются случаи размещения деривационных туннелей на большой глубине, например, на гидроэлектростанции Цирехатар в Синьцзяне (Китай), где максимальная глубина залегания туннеля превышает 1000 м. При этом туннели имеют типичную высокую температуру, характерную для контактирующих с ним пород, которая может превышать 80 °С [3].

Исследования показывают, что в условиях повышенной температуры и влажности разрушение бетонных конструкций может начаться через несколько лет после начала эксплуатации [10–

13], так как увеличивается скорость перекристаллизации и распада гидратных фаз, что способствует активизации деструктивных процессов, приводящих к падению прочности, росту пористости и проницаемости по всему объему цементного камня [14–17]. Поскольку движущей силой процесса рекристаллизации является разность растворимости между свободными частицами и контактами срастания гидратных фаз, соответственно, чем больше низкоосновных (малорастворимых) продуктов гидратации, тем более термостабильна система. Поэтому для замедления фазовых переходов при повышенных температурах и влажности необходимо использовать кремнеземсодержащие минеральные добавки в бетон, что позволит увеличить содержание низкоосновных гидросиликатов кальция.

В настоящее время вопрос о влиянии кварцевых заполнителей и наполнителей на термическую стойкость бетона мало исследован. В этой связи, данная работа посвящается изучению деградации структурно-механических свойств цементных систем с кварцем различной крупности при твердении в термовлажностных условиях.

Материалы и методы. Для исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент» ($C_3S=61,59\%$, $C_2S=14\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=13,73\%$; $HF=26\%$; начало схватывания 230 мин, активность 56,2 МПа), тонкодисперсный кварц ($S_{уд}=500\text{ м}^2/\text{кг}$); мелкий кварцевый песок фр. 0,16–0,63 мм; крупный кварцевый

песок фр. 0,63–2,5 мм. Изготавливали образцы мелкозернистого бетона 1:3 из смеси нормальной консистенции (ГОСТ 310.4-81): состав 2 – мелкий песок, В/Ц=0,5; состав 3 – крупный песок, В/Ц=0,35. Состав 1 – порошок бетона с тонкодисперсным кварцем (ПЩ:Кв=60:40, В/Ц=0,26), изготовленный из теста нормальной густоты (ГОСТ 310.3-81). Использовали образцы размером 2,5×2,5×10 см для определения прочности и 4×4×16 см для УЗ-контроля. Образцы твердели в водной среде при различных температурных условиях, в установленные сроки (1, 3, 6 и 12 мес) определяли предел прочности при сжатии и изгибе с помощью гидравлического пресса «ПГМ-100МГ4». Микроструктурные характеристики цементного камня исследовались с использованием растрового электронного микроскопа «Tescan Mira 3». Для определения скорости прохождения УЗ-сигнала при поверхностном прозвучивании бетонных образцов использовался ультразвуковой дефектоскоп «ПУЛЬСАР-2.2».

Основная часть. Полученные экспериментальные данные (табл. 1) свидетельствуют о том, что твердение образцов зависит от размера и удельной поверхности кварцевых частиц. Прочность при изгибе и сжатии цементных образцов на тонкодисперсном кварце при температуре воды 80 °С заметно превосходила твердение образцов на кварцевом песке, что вполне объяснимо, так как пылевидный кварц более активен. В нормальных условиях образцы порошкового бетона с тонкодисперсным кварцем также демонстрируют наибольшую прочность при сжатии по сравнению с другими составами. Наиболее слабое твердение в воде при 80 °С по сравнению с нормальным твердением, показали образцы с заполнителем из крупного кварцевого песка. Напротив, образцы с заполнителем из мелкого кварцевого песка лучше твердеют при температуре 80 °С, чем при 20 °С.

В нормальных условиях образцы мелкозернистого бетона (1:3) на крупном кварцевом песке занимают промежуточное положение: превосходят по прочности образцы бетона на мелком песке, что обусловлено в первую очередь пониженной водоотребностью, но уступают образцам на пылевидном кварце.

По данным прочности при сжатии рассчитан коэффициент термической стойкости (табл. 2), как отношение предела прочности образцов термовлажностного твердения к пределу прочности образцов нормального твердения: $K_{\text{терм.ст}} = R_{\text{сж}}^{80} / R_{\text{сж}}^{20}$. Как видно из приведенных данных в табл. 2 степень дисперсности частиц кварца оказывает существенное влияние на термическую стойкость образцов на основе портландцемента. Причиной повышения термической стойкости образцов с мелким и тонкодисперсным кварцем является значительная гидравлическая активность при повышенной температуре. Как показано в работе [16], молотый кварцевый песок имеет высокую гидравлическую активность близкую к активности опок при температуре 75 °С. Молотый песок значительно энергичнее взаимодействует с гидроксидом кальция, чем немолотый обычный кварцевый песок, в результате основность гидросиликатов кальция в цементном камне значительно ниже, а количество низкоосновных новообразований существенно возрастает, чем в образцах с мелким и тем более крупным кварцевым песком. В течение длительного воздействия повышенной температуры усиливается активное взаимодействие поверхности частиц мелкого зернистого кварца с гидроксидом кальция жидкой фазы цементного камня, что является причиной роста прочности. При твердении цементных образцов с крупным кварцевым песком подобное явление проявляется в меньшей степени.

Таблица 1

Кинетика твердения образцов в нормальных и термовлажностных условиях

№	Состав	Наполнитель/ заполнитель	В/Ц	20 °С				80 °С			
				1	3	6	12	1	3	6	12
Предел прочности при сжатии, МПа											
1	60:40	Фр.<0,16	0,43	44,7	49,2	52,89	56,49	42,1	76,76	69,31	65,13
2	1:3	Фр. 0,16–0,63	0,5	34,16	24,65	33,13	35,52	34,6	26,4	42,76	49,59
3	1:3	Фр. 0,63–2,5	0,36	36,16	41,60	38,51	50,00	36,73	43,12	30,14	41,8
Предел прочности при изгибе, МПа											
1	60:40	Фр.<0,16	0,43	22,17	20,9	20,7	22,46	10,78	29,2	26,71	24,8
2	1:3	Фр. 0,16–0,63	0,5	7,94	11,22	15,39	16,82	7,4	13,14	10,16	20,5
3	1:3	Фр. 0,63–2,5	0,36	14,18	17,84	19,91	19,45	3,9	9,53	19,95	11,12

У образцов с крупным песком после 6 мес твердения в воде при температуре 80 °С поверхностный слой приобрел рыхлую структуру,

наблюдалось выкрашивание частиц песка и цементного камня, изменение окраски (рис. 1). Образцы других составов не имели видимых следов структурных изменений в этот период. Однако,

после 8 мес термовлажностного твердения (80 °С) образец 4×4×16 см на пылевидном кварце самопроизвольно раскололся на 2 половинки,

при этом у образцов аналогичного состава размером 2,5×2,5×10 см до 12 мес никаких визуальных признаков разрушения не было обнаружено, что позволило провести их испытания на прочность.

Таблица 2

Коэффициент термической стойкости

№	Состав ПЦ:Заполнитель (наполнитель)	Размер частиц, мм	Время, мес			
			1	3	6	12
1	60:40	Фр.<0,16	0,94	1,56	1,31	1,15
2	1:3	Фр. 0,16-0,63	1,01	1,07	1,29	1,4
3	1:3	Фр. 0,63-0,25	1,02	1,04	0,78	0,84

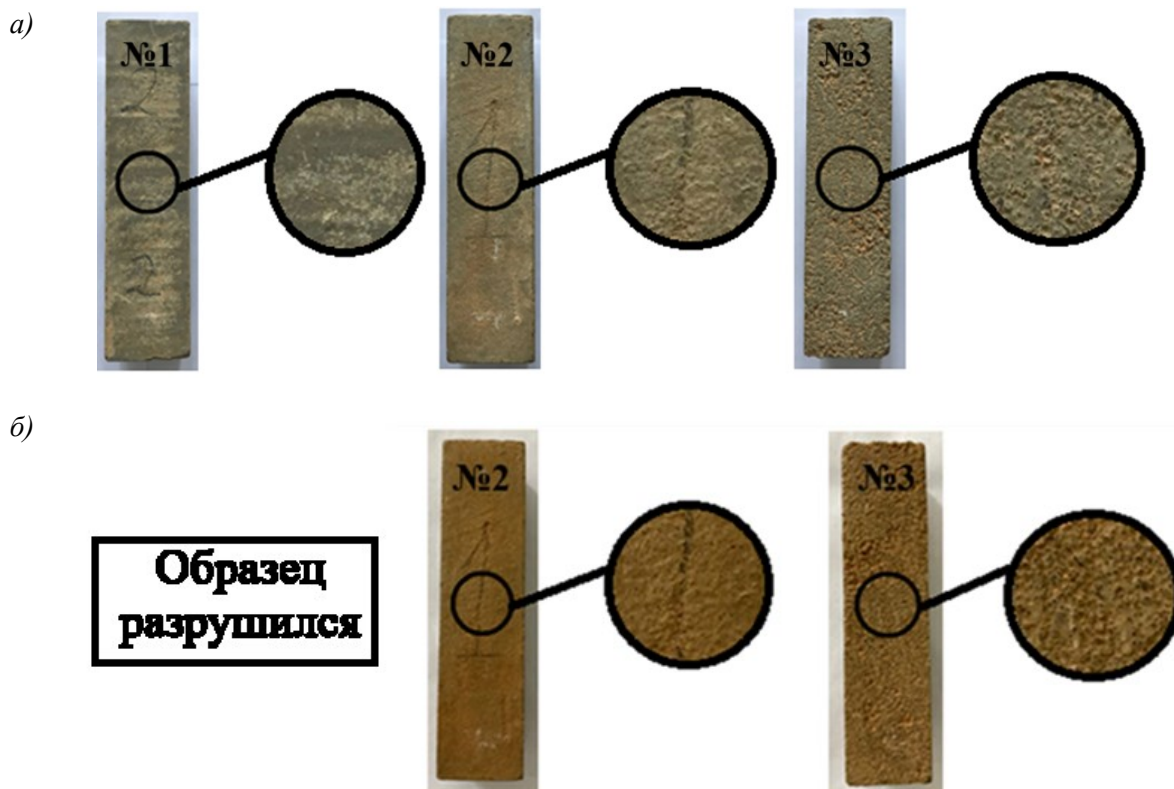


Рис.1. Образцы 4×4×16 см составов № 1-3 после 6 (а) и 12 мес (б) твердения при 80 °С

При исследовании термической коррозии весьма перспективным является применение импульсного ультразвукового метода. При этом определяется не механическая прочность, а интегральная характеристика, характеризующая комплекс структурно-механических свойств материала: прочность, пористость, трещинообразование, внутреннее напряжение структуры и т.д. При поверхностном прозвучивании образцов мелкозернистого и порошкового бетона были получены данные скорости прохождения УЗ-импульса в зависимости от времени твердения и температурно-влажностных условий (рис. 2).

Анализируя, приведенные на рис. 2 зависимости скорости распространения ультразвукового сигнала в цементных образцах с кварцем различной крупности при температуре 80 °С,

можно выделить основные этапы структурно-механических изменений. Характерно, что у всех составов *первый этап твердения* охватывает около месяца, типичным является скачкообразное изменение скорости УЗ-сигнала. Этот период связан с интенсивной гидратацией клинкерных минералов и ростом прочности, так как скорость процессов гидратации и степень гидратации вяжущего при повышенной температуре в наиболее активной фазе повышается.

Известно, что наиболее энергично на рост температуры реагируют минералы C_3A и C_4AF , при температуре 50 °С они гидратируются практически полностью в течение 1–3 сут [16]. Алит при 50 °С гидратируется на 90 %, а белит на 31 % к 7 сут, при более высокой температуре 90 °С алит гидратируется на 90 %, а белит на 22 % за 1

сут, при этом к 28 сут степень гидратации последнего достигает 87 %. Эти данные позволяют предположить, что наиболее активная фаза гидратации проходит в течение первых 1-2 недель, переходящая в более медленную фазу твердения и гидратации вяжущего, обусловленную формированием слоя из закристаллизованных гидратных новообразований, образующих плотную

оболочку вокруг частично гидратированных клинкерных частиц, препятствующую диффузии молекул воды, тем самым замедляя внутренний массообмен. Параллельно развиваются процессы взаимодействия извести с кремнеземом, ослабевающие по мере увеличения крупности частиц кварца.

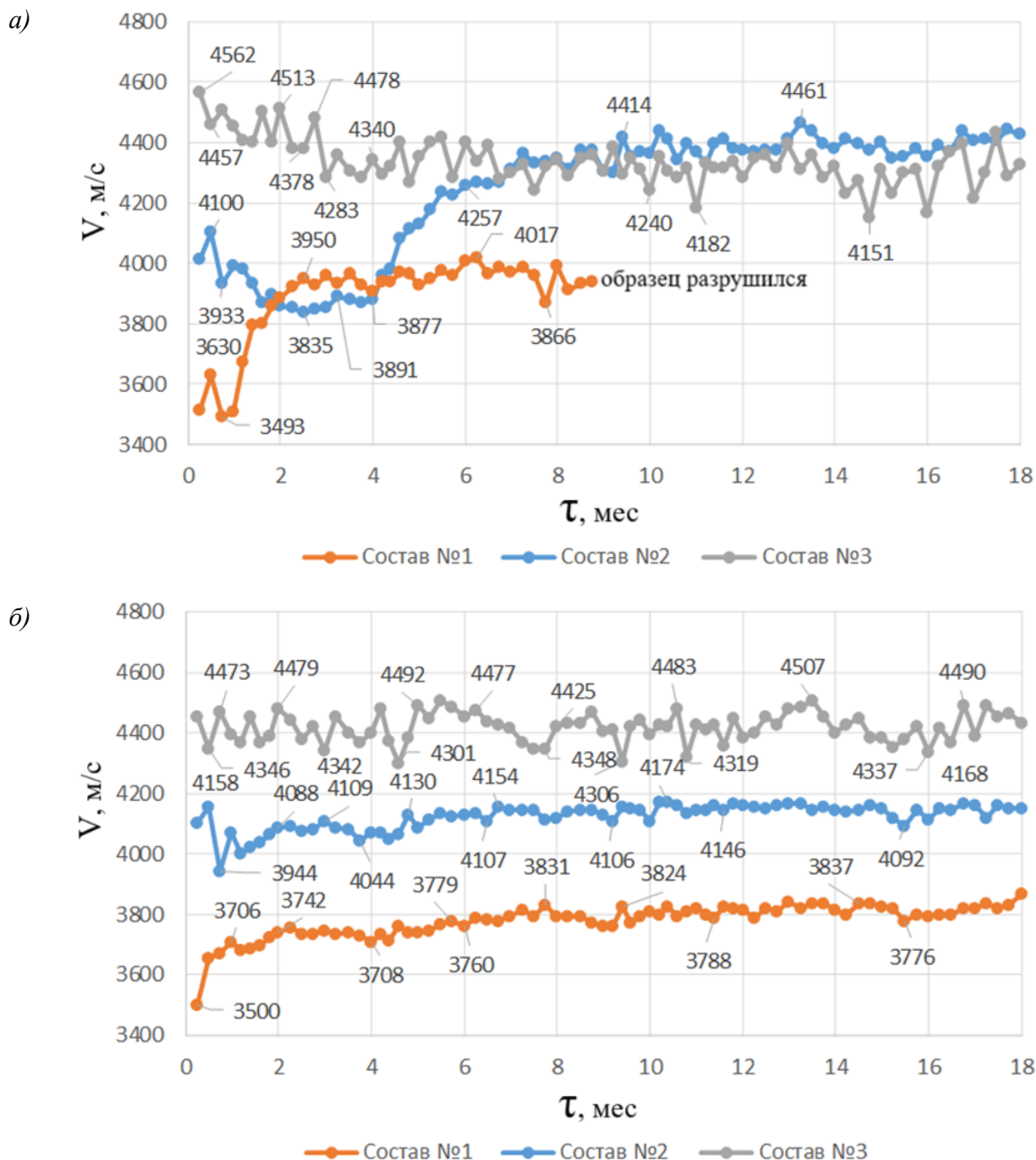


Рис. 2. Скорость прохождения УЗ-сигнала через образцы, твердевшие в воде при температуре 80 °C (а) и 20 °C (б)

Опираясь на приведенные данные (рис. 2) следует, что на *втором этапе твердения* (после 1 мес) характерный вид кривых скорости распространения ультразвукового сигнала существенно отличается в зависимости от дисперсности применяемого кварца. Причиной расхождений в структуре и свойствах затвердевших композитов

могут быть изменения основности гидросиликатов и количественного соотношения образующихся фаз. У образцов на пылевидном кварце наблюдается интенсивный рост скорости УЗ-сигнала на 200 м/с в течение от 1 до 2,5 мес, так как пылевидный кварц достаточно активно взаимодействует с известью с образованием низкоос-

новых силикатов тоберморитовой группы. Образцы мелкозернистого бетона 1:3 демонстрируют снижение УЗ-сигнала в течение от 1 до 4 мес: у образцов на мелком песке на 150 м/с, у образцов на крупном кварце скачкообразное снижение УЗ-сигнала на 280 м/с. Возможно снижение обусловлено тем, что преобладающим процессом является снижение числа гелевидных частиц и одновременный рост количества кристаллической фазы и размера кристаллов в цементном камне.

На 3-м этапе процессы структурообразования цементных систем также тесно связаны с размером применяемых кварцевых частиц. У образцов на пылевидном кварце этот период наблюдается от 2,5 до 7 мес, когда скорость УЗ-сигнала замедляется и остается практически на одном уровне. Следует учитывать, что структура цементного камня в процессе твердения при 80 °С непрерывно изменяется, возрастает скорость кристаллизационных процессов, а также образования и рекристаллизации новых фаз, параллельно развиваются как положительные (упрочнение), так и отрицательные деструктивные процессы, приводящие к снижению прочности, росту пористости и проницаемости. Выход кривой УЗ-сигнала на плато может свидетельствовать о балансе структурирующих и деструктивных процессов в образцах на пылевидном кварце.

У образцов мелкозернистого бетона 1:3 на мелком песке от 4 до 8 мес интенсивно растет скорость УЗ-сигнала на 470 м/с, что позволяет предположить, что мелкий кварцевый песок при высокой температуре в течение длительного периода приобретает активность по взаимодействию с известью. Чем меньше размер его частиц,

тем энергичнее кварц связывает гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации алита, понижая основность гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

У образцов на крупном кварцевом песке скорость УЗ-сигнала скачкообразно снижается на 100 м/с между 4 и 7 мес. Причиной падения скорости является формирование более грубодисперсной структуры новообразований, увеличение размера частиц гидратных фаз с сокращением числа контактов срастания за счет их растворения, обусловленной термодинамической нестабильностью. Это связано с тем, что процесс взаимодействия извести жидкой фазы цементного камня с крупными частицами кварца слабо выражен. Параллельно развиваются процессы межфазной перекристаллизации с образованием двухосновного α -гидрата C_2S .

4-й этап наблюдается после 7-8 мес у образцов мелкозернистого бетона 1:3. У образцов на крупном песке после 7 мес твердения наблюдается постепенный, скачкообразный спад скорости УЗ-сигнала, что свидетельствует о прогрессировании деструктивных процессов за счет разложения и перекристаллизации ранее сформированных метастабильных гидратных фаз. У образцов на мелком песке после 7 мес наблюдалась стабилизация значений скорости УЗ-сигнала с незначительными колебаниями. При этом спад показателей скорости прохождения УЗ-сигнала у образцов на пылевидном кварце после 7 мес завершился разломом испытуемого образца 4×4×16 см на две части, после 17,5 мес – на три части, после 18 мес – на 4 (рис. 3.).



Рис. 3. Разрушение образца 4×4×16 см на пылевидном кварце через 17,5 мес (а) и 18 мес (б) твердения в воде при 80 °С

Кривые скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах при твердении в воде при температуре 20 °С имеют схожий вид независимо от крупности частиц применяемого кварца: увеличение

скорости с последующей стабилизацией на протяжении всего временного интервала (рис. 2). Проведение ультразвуковых испытаний продемонстрировано на рис. 4.



Рис. 4. Ультразвуковая диагностика образца мелкозернистого бетона через 12 мес твердения в воде при 80 °С

Несмотря на то, что добавка тонкодисперсного кварца (40 %) в тампонажные растворы считается одной из наиболее эффективных для повышения их термической стойкости, как это было не раз отмечено специалистами [13–15], полученные нами результаты свидетельствуют о противоположном результате. Причина, возможно, обусловлена большим различием значений В/Ц. Для тампонажных растворов применяются смеси с высоким содержанием В/Ц (0,5 и более), в нашем эксперименте использовали образцы 4×4×16 см цементного камня с тонкодисперсным кварцем ПЦ:кв=60:40, изготовленные из теста нормальной густоты с В/Ц=0,26 (ГОСТ 310.3-81). При высоких значениях В/Ц появляющиеся в структуре внутренние напряжения гасятся благодаря повышенной пористости камня, но при низких значениях В/Ц (менее 0,5) внутренние напряжения в цементной матрице накапливаются, плохо релаксируют, что в результате привело к разрушению образца цементного камня с тонкодисперсным кварцем. Образцы меньшего размера 2,5×2,5×10 см аналогичного состава на тонкодисперсном кварце в течение 12 мес испытаний не претерпели видимых разрушений, так как внутренние напряжения в малых образцах скорее рассеиваются. Если используется кварцевый заполнитель, то это позволяет создать более устойчивую жесткую структуру.

Кроме того, тонкодисперсный кварц обладает более высокой активностью, по сравнению с мелко- и крупнозернистым кварцем, поэтому более интенсивно совершается переход высокоосновных гидросиликатов кальция C_2SH_2 в низкоосновные $CSH(B)$, при этом также происходит укрупнение кристаллов и образование некоторого количества высокоосновного $C_2SH(A)$, что в совокупности может спровоцировать спад прочности и самопроизвольный раскол образца.

Электронно-микроскопические исследования через 6 мес испытаний в горячей воде цементных образцов показали, что на контакте мелкозернистого и пылевидного кварца с цементным камнем (рис. 5) выделяется узкая зона 0,1–5 мкм хорошо закристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция, прочно связанных с кварцевой подложкой, которые выделяются от остальной CSH -фазы упорядоченно расположенными волокнистыми частицами. Это свидетельствует о большой скорости растворения кремнеземистого компонента, при этом дисперсность частиц кварца играет значительную роль. С уменьшением размера зерен кварца увеличивается реакционная способность с гидратными фазами цементной матрицы, что способствует повышению количества гидросиликатов кальция низкой основности. У частиц крупного кварца подобный слой в контактной зоне прослеживается слабо.

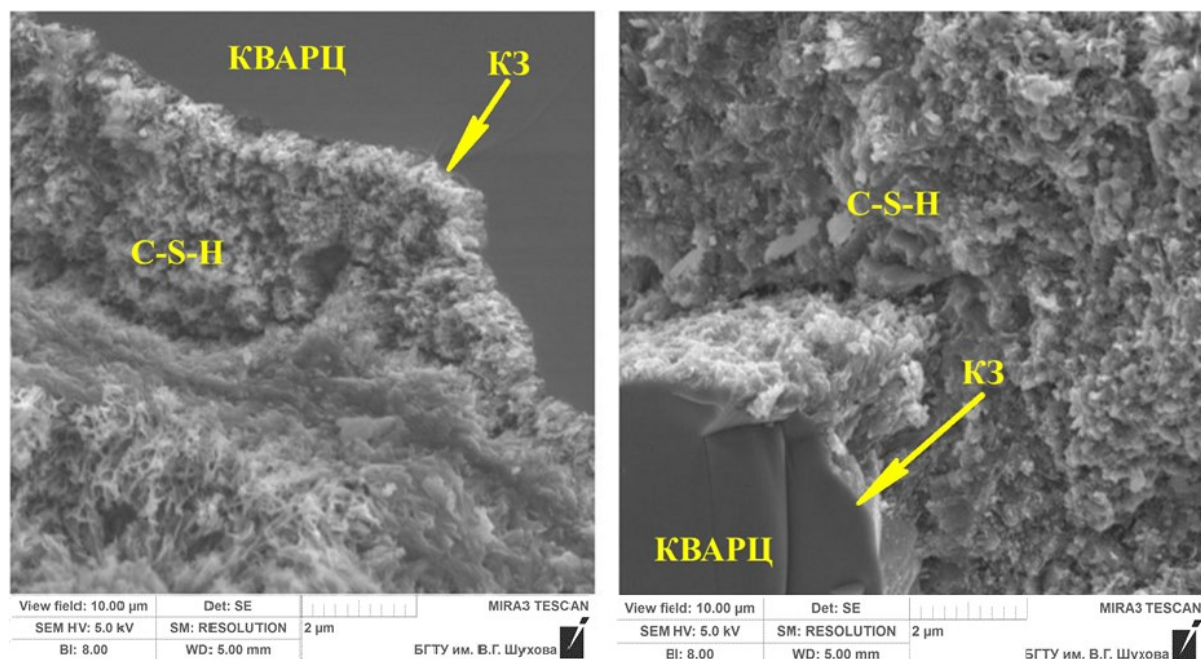


Рис. 5. Микроструктура зоны контакта мелкозернистого кварца (а) и микрокварца (б) с цементной матрицей; 6 мес; 80 °С

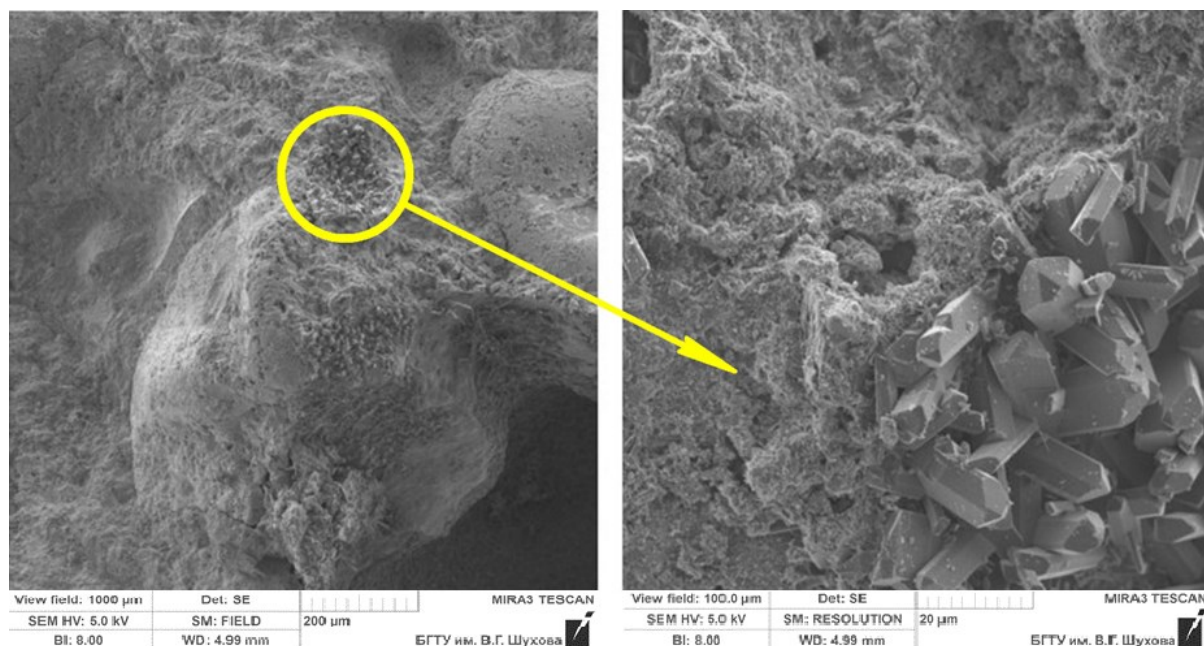


Рис. 6. Микроструктура мелкозернистого бетона (крупный кварц); гидросиликаты $C_2SH(A)$; 6 мес; 80 °С

При этом у образцов на крупнозернистом кварце в процессе перекристаллизации происходит неравномерное распределение частиц гидросиликатов кальция, с образованием друз с направленным ростом хорошо огранных призматических кристаллов, характерных для двухосновного α -гидрата C_2S (рис. 6). С повышением крупности кварцевого песка происходит уменьшение его удельной поверхности, что приводит к увеличению толщины цементной оболочки вокруг частиц заполнителя, по сравнению с более мелким песком. Сокращение удельной поверхности зернистого кварца уменьшает площадь контакта, где в основном наблюдается химическое взаимодействие гидратных фаз и прежде всего

гидроксида кальция при температуре 80 °С с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция. Следует также учесть, что растворимость кварца снижается с увеличением размера зерен. Это приводит к тому, что за пределами контактной зоны, где ослабевает влияние реакционной активности кварца, гидросиликаты в основном представлены продуктами с высокой основностью, которые термодинамически неустойчивы и перекристаллизуются в $C_2SH(A)$, что подтверждается данными микроструктуры на рис. 6. Скопления двухосновного гидросиликата $C_2SH(A)$ представлены крупными призматическими кристаллами (2–20 мкм), объединенными в друзы, малой удельной поверхностью и низким

числом контактов срастания, с плохими связующими свойствами.

Выводы. Кинетика набора прочности и термическая стойкость образцов порошкового и мелкозернистого бетона в условиях повышенной тепловой и влажностной нагрузок находится в тесной зависимости от крупности кварцевых частиц. К основным факторам, определяющим физико-химические процессы при длительном термовлажностном твердении, можно отнести размеры частиц кварца, соотношение между кварцевым заполнителем (наполнителем) и вяжущим, водоцементное отношение. Данные об изменении скорости прохождения ультразвука свидетельствуют о том, что на мелком кварцевом песке происходит формирование структуры, наиболее устойчивой в условиях воздействия повышенной тепловой и влажностной нагрузок, что дает возможность существенно снизить интенсивность термической коррозии. Образцы бетона с крупным кварцем подвержены в большей степени деструктивным изменениям, а с пылевидным кварцем продемонстрировали тенденцию к быстрому разрушению. Использование портландцемента с добавкой мелкого кварцевого песка фракции 0,16–0,63 мм позволяет резко замедлить процессы перекристаллизации гидратных фаз и резко повышает долговечность и стабильность физико-механических свойств бетонных изделий и конструкций в условиях повышенной относительной влажности воздуха и температуры.

Отмечая влияние кварцевого заполнителя (наполнителя) на термическую стойкость бетона следует отметить, что роль вяжущего при этом не снижается, как фактора, регулирующего взаимодействие цементного камня и заполнителей в процессе формирования эксплуатационно-строительных показателей бетона.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рябова Л.И. Тампонажные растворы повышенного качества // Бурение и нефть. 2003. С. 30–32.
2. Толыпина Н.М., Чашин Д.Ю. Деградация цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. №3 (37). С. 109–117.
3. Bai Y., Su H., Yin B., Yuebo C. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. Pp. 104906–104917. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104906.
4. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5597918.
5. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete // Journal of Materials in Civil Engineering. 2021. Vol. 23. P. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225.
6. Промышленные тепловые электростанции / под ред. Е.Я. Соколова. М.: Энергия, 1979. 296 с.
7. Калатузов В.А. Проблемы обеспечения надежности железобетонных вытяжных башен градирен // Энерго-INFO. 2009. № 10(33).
8. Мазур В.А., Куценко Т.Н., Петров С.В. Выбор рационального метода ремонта монолитных железобетонных оболочек градирен с учетом использования различных средств подмазывания // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 6. С. 11–18.
9. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments // International Journal of Concrete Research. 2018. № 12(2). Pp. 145–159. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.
10. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Оптимизация процесса выбора типа цемента для изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211.
11. Славчева Г.С., Ким Л.В. Механизмы и закономерности изменения прочностных характеристик бетонов в связи с их температурно-влажностным состоянием // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2015. № 1(22). С. 63–68.
12. Толыпина Н.М., Чашин Д.Ю., Хахалева Е.Н. Особенности фазообразования в цементных системах при повышенных температурах и влажности // VII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», посвященная 170-летию В.Г. Шухова: сб. докл., Белгород, 12 апреля 2023 г. Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. С. 237–241.
13. Бабушкин В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1968. 187 с.
14. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов. М.: Недра, 1978. 293 с.
15. Рахимбаев Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов. Ташкент: Фан УзССР, 1976. 159 с.

16. Ge Z., Yao X., Wang X., Zhang W. Thermal performance and microstructure of oil well cement paste containing subsphaeroidal koniline flour in HTHP conditions // Construction and Building Materials. 2018. № 172. Pp. 787–794. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.268.

17. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. Pp. 103931–103947. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931.

Информация об авторах

Толыпина Наталья Максимовна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рахимбаев Шарк Матрасулович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чашин Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: dmitriychashin11@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 10.11.2024 г.

© Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю., 2025

Tolypina N.M., Rakhimbaev S.M., *Chashin D.Y.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: dmitriychashin11@gmail.com

THE INFLUENCE OF QUARTZ PARTICLE SIZE ON THE DEGRADATION OF CEMENT STONE UNDER HIGH TEMPERATURE AND HUMIDITY

Abstract. This article explores the effect of quartz aggregates and fillers on the thermal resistance of concrete. Experimental data indicate that the hardening kinetics of concrete samples with varying quartz particle sizes in water at 80 °C differ significantly from those in normal conditions (20 °C). The thermal resistance coefficient of samples increased with the particle size of quartz, from 0–0.16 mm to 0.16–0.63 mm to 0.63–2.5 mm, showing values of 1.15, 1.40, and 0.84, respectively, after 12 months of testing. Ultrasonic testing revealed that fine quartz sand forms a structure highly resistant to elevated thermal and moisture stress, which significantly reduces the rate of thermal corrosion. Concrete samples with coarse quartz exhibited gradual degradation, while those with fine quartz particles tended to degrade more quickly. The cause of destruction in conditions of thermal corrosion is attributed to recrystallization processes of hydrated phases, accompanied by the dissolution of small hydrate particles and the formation of larger particles, resulting in the formation of α -dicalcium silicate hydrate, which possesses poor binding properties.

Keywords: thermal corrosion, cement stone, degradation, microstructure, hydrosilicates, strength.

REFERENCES

1. Ryabova L.I. Tamponage Solutions of Increased Quality [Tamponazhnye rastvory povyshennogo kachestva]. Burenie and nef. 2003. Pp. 30–32. (rus)
2. Tolypina N.M., Chashin D.Y. Degradation of cement stone under conditions of elevated temperature and humidity [Degradatsiya tsementnogo kamnya v usloviyakh povyshennoy temperatury i vlazhnosti]. Bulletin of GSTOU. Technical sciences. 2024. No. 3 (37), Pp. 109–117. (rus)
3. Bai Y., Su H., Yin B., Yuebo C. Mechanical properties and damage mechanisms of concrete under four temperature gradients combined with acoustic emission method. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 57. Pp. 104906–104917. DOI: 10.1016/j.job.2022.104906.
4. Yu Z., Zhang F., Ma X., Yang F., Hu D., Zhou H. Experimental Study on Thermal Expansion Behavior of Concrete under Three-Dimensional Stress. Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2021/5597918.
5. Kodur V.K.R., Khaliq W. Effect of temperature on thermal properties of different types of high-strength concrete. Journal of Materials in Civil Engineering. 2021. Vol. 23. Pp. 793–801. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000225.
6. Industrial Thermal Power Plants [Promyshlennyye teplovye elektrostantsii]. ed. by E.Ya. Sokolov. Moscow: Energia, 1979. 296 p. (rus)

7. Kalatuzov V.A. Issues of Ensuring the Reliability of Reinforced Concrete Cooling Tower Exhaust Shafts [Problemy obespecheniya nadezhnosti zhelezobetonnykh vytyazhnykh bashen gradiren]. *Energo-INFO*. 2009. No. 10(33). (rus)

8. Mazur V.A., Kutsenko T.N., Petrov S.V. Selection of the Optimal Repair Method for Monolithic Reinforced Concrete Shells of Cooling Towers, Considering the Use of Various Scaffolding Means [Vybór ratsionalnogo metoda remonta monolitnykh zhelezobetonnykh obolochek gradiren s uchetom ispolzovaniya razlichnykh sredstv podmashchivaniya]. *Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020. No. 6. Pp. 11–18. (rus)

9. Smith J.D. Durability of Concrete Structures in Hot Water Environments. *International Journal of Concrete Research*. 2018. No. 12(2). Pp. 145–159. DOI: 10.1007/s13369-010-0033-5.

10. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Optimization of the Process of Selecting Cement Types for Products Operated in Aggressive Environments [Optimizatsiya protsessa vybora tipa tsementa dlya izdeliy, ekspluatiruyushchikhsya v aggressivnykh sredakh]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 3. Pp. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. (rus)

11. Slavcheva G.S., Kim L.V. Mechanisms and Patterns of Strength Characteristics Changes of Concrete in Relation to Their Temperature and Humidity Condition [Mekhanizmy i zakonomernosti izmeneniya prochnostnykh kharakteristik betonov v svyazi s ikh temperaturno-vlazhnostnym sostoyaniem]. *Bulletin of the Engineering School of FEFU*. 2015. No. 1(22). Pp. 63–68. (rus)

12. Tolypina N.M., Chashin D.Yu., Khakhaleva E.N. Features of Phase Formation in Cement Systems at Elevated Temperatures and Humidity [Osobennosti fazoobrazovaniya v tsementnykh sistemakh pri povyshennykh temperaturakh i vlazhnosti]. VII International Scientific and Practical Conference "Science and Innovation in Construction," dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov: conference proceedings, Belgorod, April 12, 2023. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2023. Pp. 237–241. (rus)

13. Babushkin V.I. Physicochemical Processes of Concrete and Reinforced Concrete Corrosion [Fiziko-khimicheskiye protsessy korrozii betona i zhelezobetona]. Moscow: Stroyizdat, 1968. 187 p. (rus)

14. Danushevsky V.S. Design of Optimal Compositions of Tamponage Cements [Proyektirovanie optimal'nykh sostavov tamponazhnykh tsementov]. Moscow: Nedra, 1978. 293 p.

15. Rakhimbaev Sh.M. Regulation of Technical Properties of Tamponage Solutions [Regulirovanie tekhnicheskikh svoystv tamponazhnykh rastvorov]. Tashkent: Fan UzSSR, 1976. 159 p. (rus)

16. Ge Z., Yao X., Wang X., Zhang W. Thermal Performance and Microstructure of Oil Well Cement Paste Containing Subsphaeroidal Koniline Flour in HTHP Conditions. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 172. Pp. 787–794. DOI: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.268.

17. Shen Z., Zhou H., Brooks A., Hanna D. Evolution of elastic and thermal properties of cementitious composites containing micro-size lightweight fillers after exposure to elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 118. Pp. 103931–103947. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103931.

Information about the authors

Tolypina, Natalia M. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Rakhimbaev, Shark M. Doctor of Technical Sciences, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Chashin, Dmitriy Y. Postgraduate student. E-mail: dmitriychashin11@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostiukovst. 46.

Received 10.11.2024

Для цитирования:

Толыпина Н.М., Рахимбаев Ш.М., Чашин Д.Ю. Влияние крупности частиц кварца на деградацию цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

For citation:

Tolypina N.M., Rakhimbaev S.M., Chashin D.Y. The influence of quartz particle size on the degradation of cement stone under high temperature and humidity. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 5. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29

Тараненко Д.В.

Сибирский федеральный университет

E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СТЕН ЗА СЧЁТ ВКЛЮЧЕНИЯ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ МАТЕРИАЛОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФАЗОВЫМ СОСТОЯНИЕМ

Аннотация. Материалы с изменяющимся фазовым состоянием (МИФС) представляют большой интерес ввиду их существенных преимуществ в повышении энергоэффективности, поддержании теплового комфорта в зданиях и содействии сокращению загрязнения окружающей среды. Исследования энергосберегающей способности строительных конструкций с МИФС выполнены в основном зарубежными авторами и рассматривают здания, расположенные в теплом климате.

В работе представлены результаты численного исследования наружных стен с МИФС в соответствии с требованиями отечественных норм по тепловой защите, для континентального климата г. Красноярск. Предварительно проведена верификация численной реализации алгоритма расчета, который учитывает наличие у МИФС несовпадение температур плавления и кристаллизации (термического гистерезиса). Явление термического гистерезиса во многих исследованиях не учитывается. Между тем, применение упрощенных алгоритмов, которые не включают гистерезис, может привести к существенным неточностям. В связи с этим, в расчетах исследования учтен эффект гистерезиса. Предложена методика по выбору МИФС для использования их в наружных ограждающих конструкциях. Конструкция стены с выбранным МИФС привела к уменьшению расхода тепловой энергии на 13,7 % относительно исходной конструкции в дни отопительного периода, и на 8,5 % – относительно исходной конструкции при одинаковой толщине конструкций. Сделан вывод о перспективности использования нескольких слоев МИФС с различными друг от друга температурами фазового перехода.

Ключевые слова: материалы с изменяющимся фазовым состоянием, фазовый переход, энергосбережение, энергопотребление, гистерезис, аккумулирование тепловой энергии, энергоэффективность.

Введение. За последнее десятилетие проведено множество исследований, направленных на повышение энергоэффективности ограждающих конструкций зданий за счет использования в конструкциях материалов с изменяющимся фазовым состоянием. Данные материалы, обладая возможностью осуществления фазовых переходов 1-го рода, характеризуются постоянством температур во время изменения энтальпии (теплота кристаллизации или плавления). Процессы плавления и кристаллизации материала сопровождаются затуханием амплитуды температурной волны при прохождении сквозь материал, а при размещении МИФС в теплозащитной оболочке здания способствуют снижению затрат на поддержание комфортной температуры помещения.

В настоящее время разработаны различные способы включения материала, имеющего жидкую фазу, в состав строительных конструкций. Из них: заключение материала в оболочку (в зависимости от размеров оболочки различают микро- и макрокапсуляцию); получение материала стабилизированной формы [1] путем объединения МИФС и вспомогательного материала [2]; пропитка пор строительных материалов [3]. В дальнейшем материал стабилизированной формы, в том числе микрокапсулированный материал, может быть добавлен в строительные

растворы [4] или использован как самостоятельное изделие (например, в виде стеновых панелей [5]).

Большинство исследований с интеграцией МИФС в конструкции зданий выполнены зарубежными авторами и проведены в условиях теплого климата [6, 7, 8].

Существуют исследования отечественных авторов, выполненных с учетом климатических условий различных регионов Российской Федерации. Так, в [9] представлен анализ влияния фазовых переходов на тепловой баланс здания в Москве, Санкт-Петербурге и Сочи. Авторами сделан вывод об актуальности разработки МИФС с теплофизическими характеристиками, отвечающими различным регионам страны с учетом соответствующих сезонных температур окружающего воздуха. В эксперименте [10], проведенном в г. Якутске, показана практическая возможность и эффективность использования фазового перехода воды для отопления закрытых помещений до высоких отрицательных температур, что уместно для складских помещений и стояночных гаражей. В [11] рассмотрена концепция наружной ограждающей стены с использованием теплоаккумулирующей вставки, за счет использования которой можно варьировать время промерза-

ния стены в случае отключения системы отопления в условиях Крайнего Севера. В [12] реализован выбор материала для накопления тепловой энергии с использованием метода анализа иерархий.

Однако большинство численных исследований и коммерчески доступных расчетных программ используют упрощенных алгоритмы, не учитывающие наличие термического гистерезиса у большинства МИФС [13, с. 182, 14]. Термический (тепловой) гистерезис характеризуется несовпадением температур плавления и кристаллизации, а также термодинамических характеристик материала (энтальпии, плотности) при нагреве и охлаждении [15]. Для большого числа непарафиновых органических и неорганических МИФС применение упрощенных алгоритмов, которые не включают гистерезис, может приводить к существенным неточностям [13, с. 182, 14, 16, 17].

Цель исследования – оценить эффект экономии тепловой энергии от использования материала с изменяющимся фазовым состоянием в качестве добавочного слоя к наружной стене, которая

$$C_{eff}(T) = \begin{cases} C_S, & T < T_s, \\ \frac{L}{T_L - T_s} + \frac{C_S + C_L}{2}, & T_s \leq T \leq T_l \\ C_L, & T > T_l \end{cases}$$

где C_S – удельная теплоемкость твердой фазы, Дж/кг/К; C_L – удельная теплоемкость жидкой фазы, Дж/кг/К; L – удельная теплота фазового перехода (кристаллизации или плавления), Дж/кг; T – температура, К; T_s – температура завершения кристаллизации или температура начала плавления, К; T_l – температура завершения плавления или температура начала кристаллизации, К.

Для расчета фазовых переходов с термическим гистерезисом, МИФС рассмотрен как смесь твердой и жидкой фазы. Алгоритм моделирования гистерезиса представлен в работе [14].

Для жидкой фазы конвективный перенос теплоты не учитывается, поэтому уравнение теплопроводности любой фазы:

$$C_{eff} \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + f \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м/К; $\text{grad}T$ – градиент температуры, К/м; f – мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Численное моделирование выполнено в программе COMSOL Multiphysics в одномерном пространстве. На наружной и внутренней поверхностях конструкций заданы граничные условия третьего рода. Температура наружного воздуха принята по данным метеостанции, температура внутреннего воздуха постоянна и составляет

соответствует нормативным требованиям к тепловой защите, применительно к процессу отопления жилых зданий, расположенных в климате г. Красноярска, с учетом теплового гистерезиса МИФС.

Для выполнения цели исследования поставлены следующие последовательно решаемые задачи:

- 1) определить начало и продолжительность временного периода, при котором использования МИФС представляется наиболее рациональным;
- 2) определить температуру фазового перехода МИФС и его положение в ограждающей конструкции;
- 3) оценить максимальную экономию тепловой энергии в конструкции стены с МИФС относительно контрольной стены.

Материалы и методы. В основе методов моделирования теплообмена при плавлении и кристаллизации лежит задача Стефана [18]. Для численного решения этой задачи использован метод эффективной теплоемкости, который подразумевает замещение теплоемкости МИФС эффективной теплоемкости C_{eff} , Дж/кг/К [16]:

$$\begin{aligned} T &< T_s, \\ T_s &\leq T \leq T_l \\ T &> T_l \end{aligned} \quad (1)$$

+21°C в соответствии с ГОСТ 30494-2011. Коэффициенты теплоотдачи согласно нормативной литературе: 12 Вт/(м²°C) для наружной поверхности и 8,7 Вт/(м²°C) для внутренней. В качестве начального температурного распределения принят результат предварительного расчета, выполненного с указанными выше граничными условиями.

Верификация расчетной модели. В рамках верификации, модельный материал (вода) помещен в пластиковую форму в виде полого шара. Датчики температуры размещены в центре формы, на поверхности формы и на удалении от нее, для фиксирования температуры окружающей среды. Осуществлен полный цикл кристаллизации-плавления материала при контролируемой внешней температуре (рисунок 1).

Показана хорошая сходимость расчетной и экспериментальной температур в центре формы. Ошибка расчета от начала до времени завершения цикла плавления-кристаллизации определена по формуле [19]:

$$\text{ошибка} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |T_i - T_i^*| \quad (3)$$

где n – число временных шагов для сравнения, (шаг 60 с.); T_i – температура расчетная на i -ом временном шаге, °C; T_i^* – температура экспериментальная на i -ом временном шаге, °C.

Ошибка составила $1,21^{\circ}\text{C}$, что является допустимым.

Наибольшее расхождение между фактическими и расчетными температурами наблюдается во втором часу опыта, когда происходит переохлаждение жидкости. В расчетах эффект переохлаждения не учитывается как оказываемый

малое влияние на величину теплового потока, при постоянном изменении температур наружного воздуха. Кроме того, исследуемые в работе марки МИФС имеют органическое происхождение, для которых в целом данный эффект отсутствует или менее выражен [20].

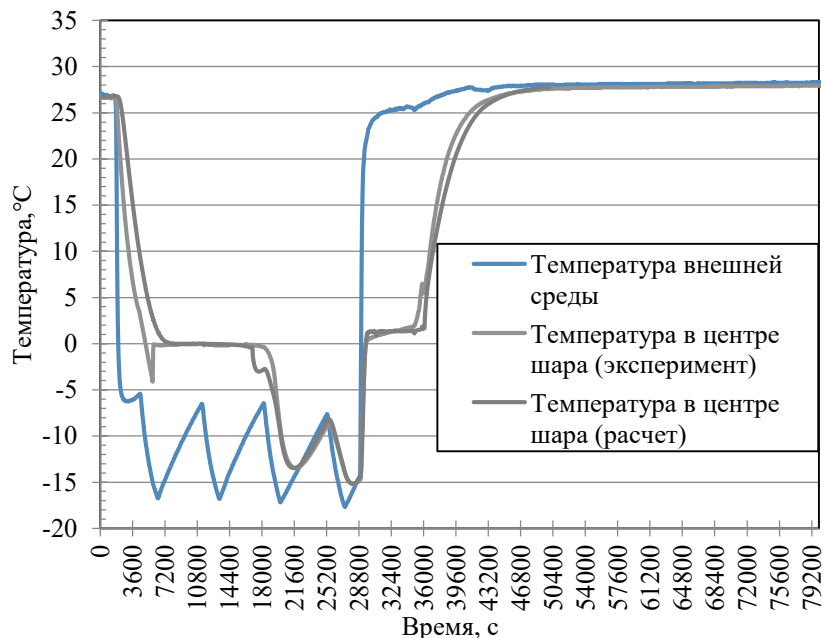


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные кривые для верификации модели

Основная часть. Выбор температур наружного воздуха для промежуточных расчетов. На рисунке 2 представлен график частотного распределения среднесуточных температур

наружного воздуха за отопительный период для г. Красноярска.

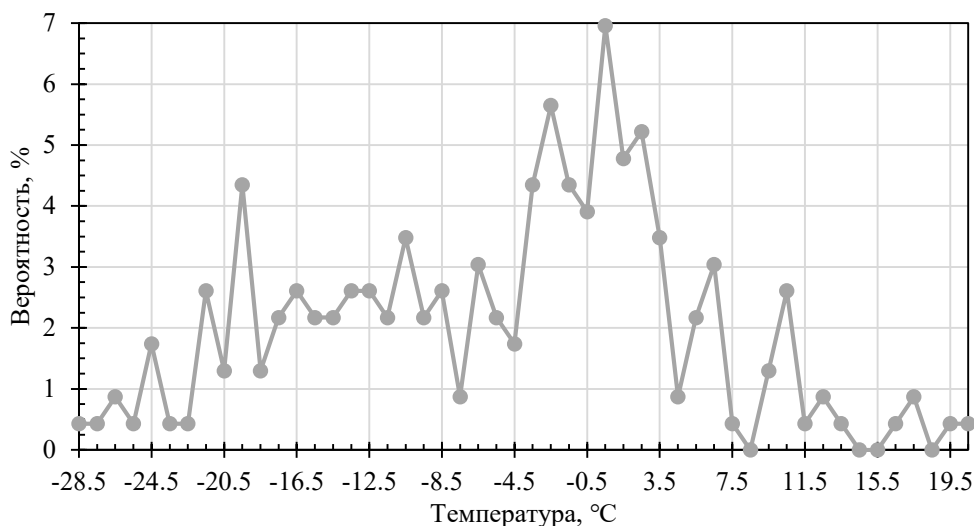


Рис. 2. Вероятность повторения температур

Максимальную частоту повторения имеют температуры от 0°C включительно до 1°C . Таким образом, большее количество фазовых превращений (или большая их продолжительность) возможны на периоде времени с наибольшим числом переходов через температуры $0^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C}$.

Для определения подобного периода времени, отопительный период разделен на некоторые элементарные части (декады) таким образом, чтобы на одну из частей приходилось наибольшее возможное число переходов через 0°C .

Наибольшим числом переходов обладает декада с 28 сентября по 7 октября 2022г (показана на рисунке 3).

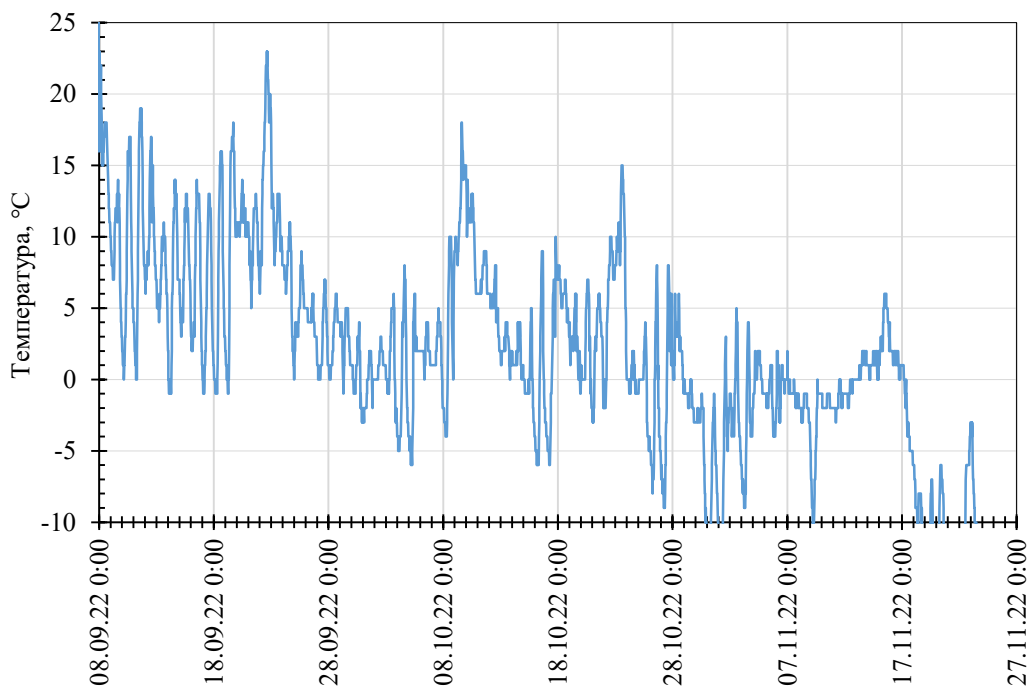


Рис. 3. График температур с переходами через 0°C

Укрупнение указанного периода за счет объединения с соседними декадами неизбежно приводит к уменьшению среднего количества переходов через 0°C, поэтому в дальнейших расчетах для задания граничных условий на наружной поверхности стены выбраны температуры воздуха только данной декады.

Определение марки МИФС и положения в конструкции. На рисунке 4 показана исходная конструкция стены, сопротивление теплопередачи которой соответствует требуемому сопротивлению теплопередачи, определенному согласно СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» для конструкций, эксплуатируемых в г. Красноярске.

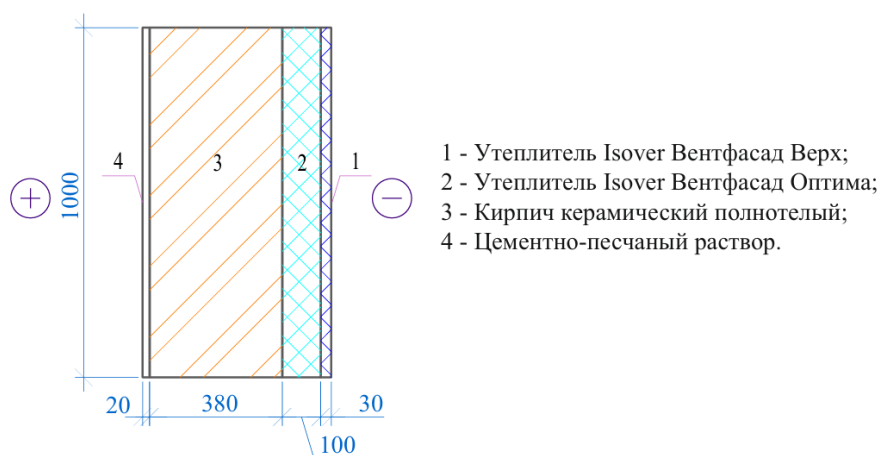


Рис. 4. Схема стены с утеплением минеральной ватой в два слоя

Многие коммерческие марки МИФС (номенклатура которых дана в [6]) плавятся и кристаллизуются в некотором температурном диапазоне ΔT (ΔT_{melt} и ΔT_{freeze} соответственно), величина которого для этих двух процессов может отличаться. Если принять, что T_1 – температура, при которой полностью завершается плавление,

а T_2 – температура, при которой полностью завершается кристаллизация, то разность между ними ΔT_{1-2} у МИФС с осуществлением фазового перехода в диапазоне температур превышает 5°C–10°C, что в температурных условиях отапливаемого помещения приводит к снижению возмож-

ности осуществления полных фазовых переходов, в случае размещения МИФС ближе к внутренней поверхности стены. Исходя из этого, задача выбора и расположения МИФС в стене требует определения амплитуды температурных волн, проходящих стену.

Максимальные и минимальные температуры исходной конструкции за выбранную декаду показаны на рисунке 5.

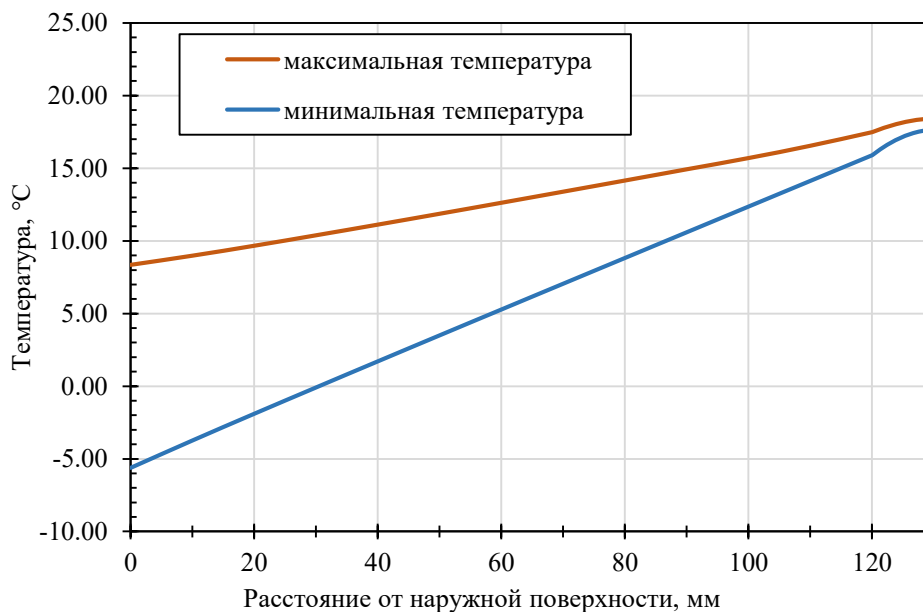


Рис. 5. Температуры в исходной конструкции стены

На рисунке 5 видно, что температурный диапазон ΔT , которым должен обладать МИФС для выполнения полного фазового перехода (в связи с чем диапазон ΔT не должен превышать разницу между максимальной и минимальной температурами), уменьшается по мере удаления от наружной поверхности стены. Графики рисунка могут быть использованы для определения положения слоя МИФС в стене, после выбора марки МИФС с определенными ΔT_{melt} и ΔT_{freeze} . Так как распределение температур, показанное на рисунке 5, получено для конструкции стены без материала с фазовым переходом, после первоначального выбора марки и положения МИФС необходимо произвести уточнение.

При указанной выше разнице ΔT_{1-2} более 5°C , расстояние от внешней границы до слоя МИФС не должно превышать 80 мм, где $\Delta T = 5,4^\circ\text{C}$.

Для первого приближения принят МИФС марки savE® OM03 от компании PLUSS Advanced Technologies (МИФС1). По данным, предоставленным производителем, более 90% от общего количества тепла, обусловленное кристаллизацией, МИФС1 выделяет при температурах от $0,5^\circ\text{C}$ до $3,5^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{freeze}} = 3,0^\circ\text{C}$), и более 90% от общего количества тепла, обусловленное плавлением — поглощает при температурах от $1,5^\circ\text{C}$ до $8,5^\circ\text{C}$ ($\Delta T_{\text{melt}} = 7,0^\circ\text{C}$). Таким образом,

$\Delta T_{1-2} = 8^\circ\text{C}$ ($T_1 = 8,5^\circ\text{C}$ и $T_2 = 0,5^\circ\text{C}$), и данный материал следует расположить на расстоянии 20 мм от наружной поверхности, т.е. вместе с минимальным отклонением температур T_1 и T_2 от температур рисунка 5. Отклонение температур T_{PCM} (при $T_{\text{max}} > T_1 > T_2 > T_{\text{min}}$) определено по формуле:

$$T_{\text{PCM}} = \frac{(T_{\text{max}} - T_1) + (T_2 - T_{\text{min}})}{2} \quad (4)$$

где T_{max} и T_{min} — максимальная и минимальная температура соответственно.

В качестве второго приближения (уточнения) выполнено изменение положения МИФС1 с шагом 10 см (что эквивалентно шагу $0,286 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$) и изменение температуры плавления T_{melt} и температуры кристаллизации T_{freeze} на одинаковое значение с шагом 1°C . Данные температуры являются равноудаленными от границ ΔT_{melt} и ΔT_{freeze} соответственно:

$$T_{\text{melt}} = T_1 - \frac{\Delta T_{\text{melt}}}{2} \quad (5)$$

$$T_{\text{freeze}} = T_2 + \frac{\Delta T_{\text{freeze}}}{2} \quad (6)$$

Для МИФС1 $T_{\text{melt}} = 5^\circ\text{C}$ и $T_{\text{freeze}} = 2^\circ\text{C}$.

Результаты второго приближения показаны на рисунке 6. Из технологических соображений (удобства изготовления и монтажа) исходная (минимальная) толщина слоя МИФС — 10 мм.

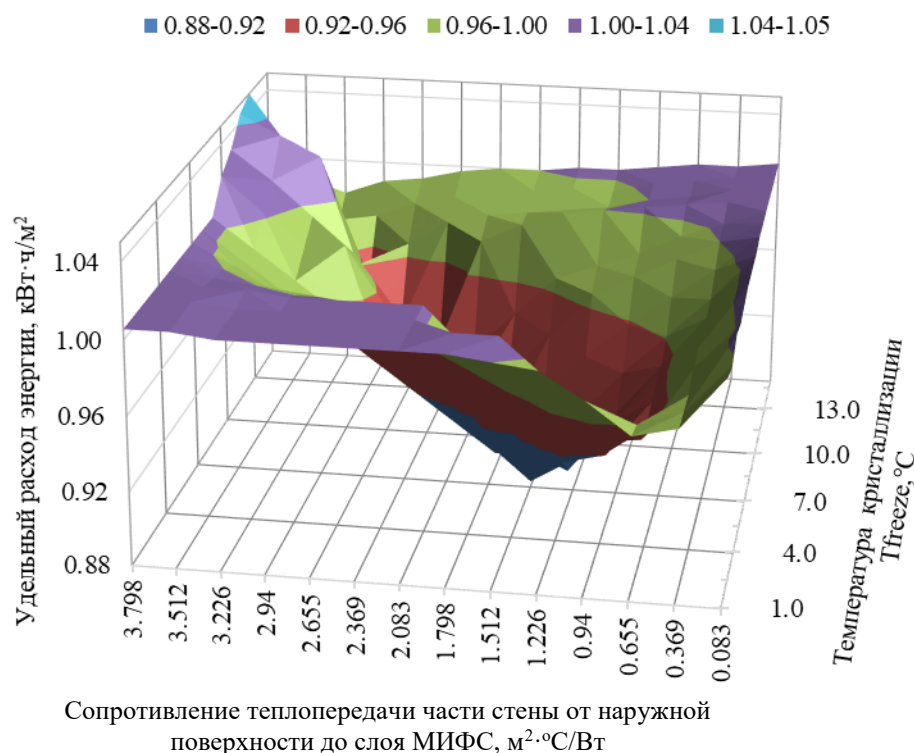


Рис. 6. Расход тепловой энергии на отопление за выбранную декаду

Как показано на рисунке 6, минимальное количество тепловой энергии через ограждающую конструкцию наблюдается при размещении материала с изменяющимся фазовым состоянием на расстоянии 50 мм от наружной поверхности (1,512 м²·°C/Вт), при увеличении температур фазового перехода на 5°C (до $T_{melt}=10,0\text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{freeze}=7,0\text{ }^\circ\text{C}$). В дальнейшем материал с увеличенными температурами фазового перехода обозначен как МИФС2. Теплофизические характеристики обоих материалов представлены в таблице 1.

На рисунке 7 видно, что при одинаковой начальной температуре слоев МИФС в обеих конструкциях (время до начала выбранной декады, показано областью серого цвета) МИФС1 не достигает начала кристаллизации ($T_{freeze} + \Delta T_{freeze}/2 = 3,5\text{ }^\circ\text{C}$). В то же время МИФС2 кристаллизуется в течение большей части расчета (температура начала кристаллизации составляет 8,5 °C), с чем и связано снижение величины расхода энергии (с 0,97 кВт·ч/м² до 0,88 кВт·ч/м²) при использовании МИФС2. Относительно конструкции исходной стены применение МИФС2 сократило расход тепловой энергии на $(1,02 - 0,88)/1,02 \cdot 100 = 13,7\%$.

Таким образом, наименьшее количество энергии на отопление за выбранную декаду получено при применении МИФС2 с размещением материала ближе к наружной поверхности стены (на расстоянии 50 мм от наружной поверхности).

Известно, что на величину расхода тепловой энергии влияет теплопроводность материалов ограждающей конструкции. В таблицу 1 сведены теплофизические характеристики марок материалов с изменяющимся фазовым состоянием, соответствующие МИФС2 по показателю ΔT_{1-2} . Для снижения годовой величины расхода тепловой энергии, следует применять МИФС с меньшим коэффициентом теплопроводности.

Меньшим относительно МИФС2 коэффициентом теплопроводности, усредненным по двум фазам, обладает savE® OM08 (МИФС3, средний коэффициент теплопроводности 0,1765 Вт/м·°C). При этом теплопроводность твердой фазы МИФС2 ниже.

Далее проведено сравнение этих материалов.

Оценка экономии тепловой энергии от использования МИФС. Выполнен поочередный расчет исходной стены с МИФС2 и МИФС3 в пределах выбранной декады с варьированием толщины слоя материала с изменяющимся фазовым состоянием при его постоянном положении в стене, на расстоянии 50 мм от наружной поверхности. Вычислено максимальное снижение расхода тепловой энергии от использования в составе конструкции стены в качестве добавочного слоя материала с фазовым переходом путем сравнения количества энергии, проходящее через стены с МИФС и исходной стены, при условии одинаковой толщины конструкций, в связи с чем толщина минеральной ваты исходной стены, не

имеющей слоя МИФС, увеличена на толщину добавочного слоя.

Результаты показаны на рисунке 8.

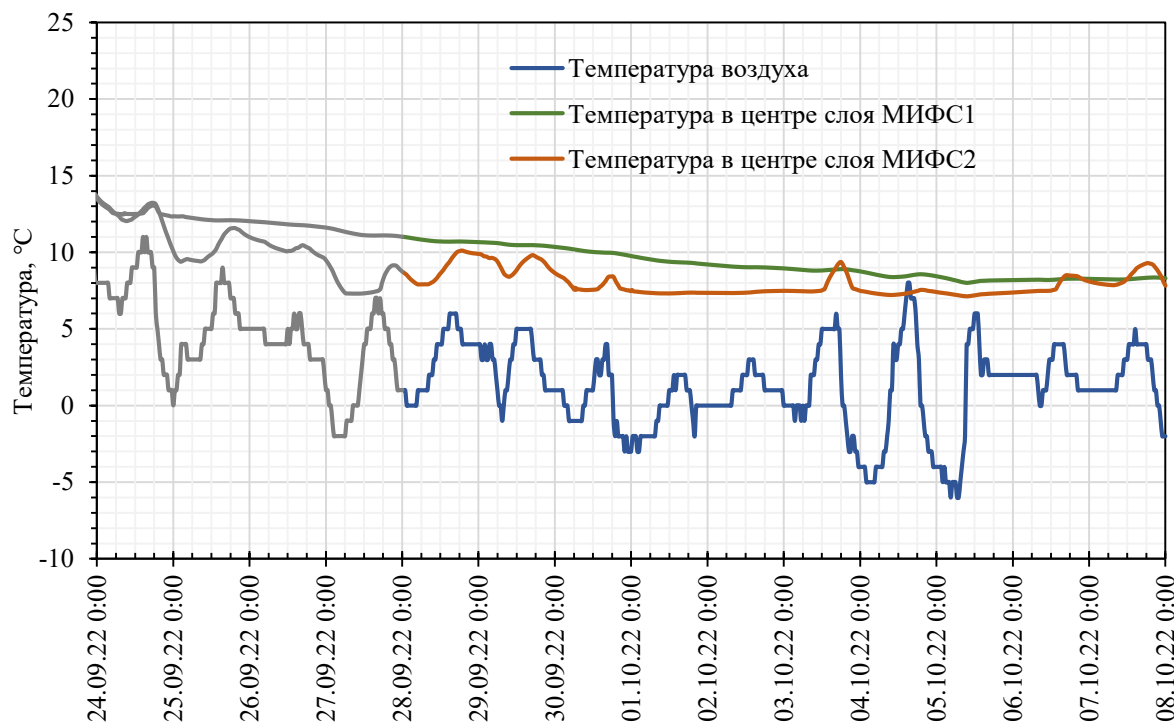


Рис. 7. Температуры в стене при фазовом переходе

Таблица 1

Характеристики материалов с изменяющимся фазовым состоянием

Марка МИФС	Теплота, кДж/кг		Теплопроводность фазы, Вт/м/°C		Теплоемкость фазы, кДж/кг/°C		Плотность фазы, кг/м ³	
	кристаллизации Lfreeze	плавления Lmelt	жидкой Kl	твердой Ks	жидкой Cl	твердой Cs	жидкой ρl	твердой ρs
RUBITHERM® RT5HC	240	241	0,2	0,2	2	2	760	850
savE® OM08 (МИФС3)	150	154	0,118	0,235	2.11	1.71	1020	1190
CrodaTherm™ 9.5	186	186	0,15	0,24	2.1	2.2	858	963
RUBITHERM® RT10HC	185	182	0,2	0,2	2	2	770	850
RUBITHERM® RT11HC	183	181	0,2	0,2	2	2	770	880
savE®OM03(МИФС1), МИФС2	228	196	0,146	0,224	1,91	1,76	835	912

Для выбранной декады оптимальным остается применение МИФС2 с увеличенной до 15 мм толщиной слоя (рисунок 9) – величина расхода тепловой энергии составила 0,85 кВт·ч/м² за 10 суток, что на 8,5% ниже, чем для исходной конструкции без МИФС, с увеличенной до 145 мм толщиной минеральной ваты.

При сравнении стены, схема которой изображена на рисунке 9, со стеной без МИФС и минеральной ватой толщиной 145 мм (исходная кон-

струкция с увеличенной на 15 мм толщиной утеплителя), абсолютное значение тепловых потоков через стену с МИФС на большей части расчетного времени больше (рисунок 10), что объясняется гораздо большим коэффициентом теплопроводности материала с изменяющимся фазовым состоянием. Это особенно заметно в отопительный период, когда происходит увеличение разницы температур помещения и наружного воздуха.

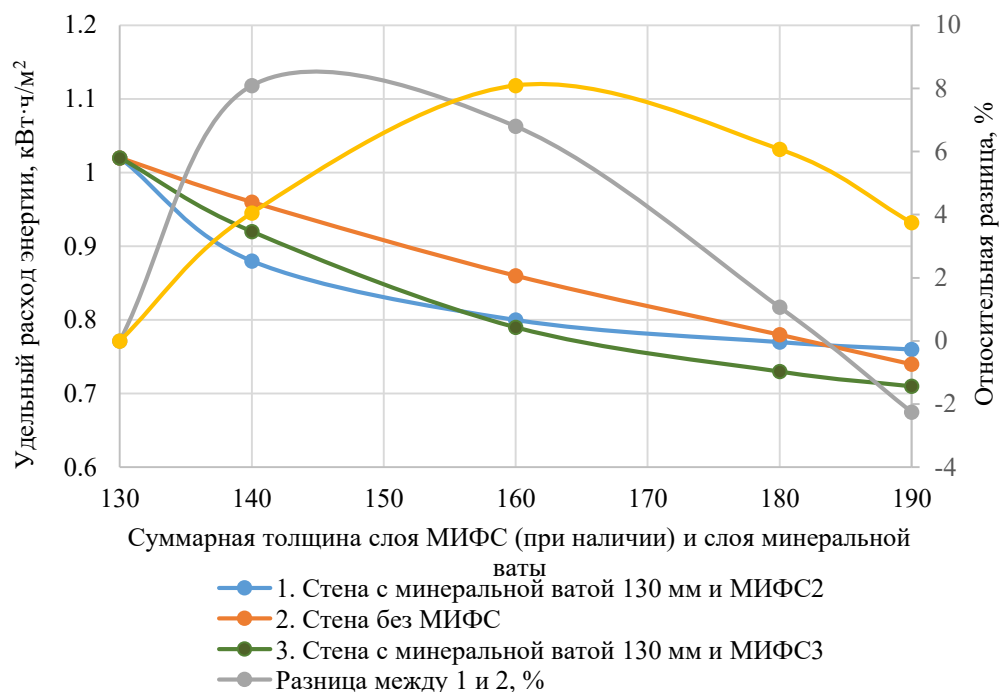


Рис. 8. Зависимости расхода энергии на отопление от толщины слоя утеплителя и МИФС

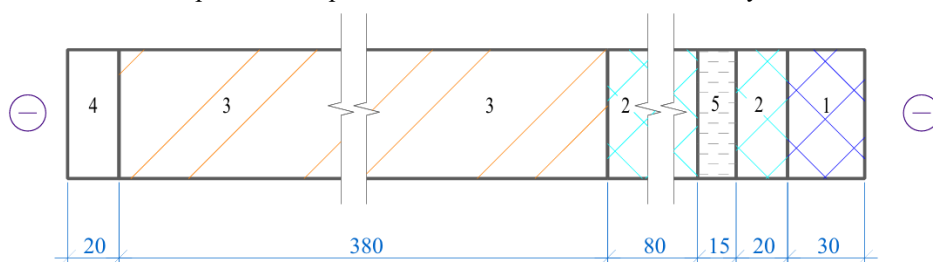


Рис. 9. Конструкция стены с толщиной слоя МИФС2 15 мм

1 – Утеплитель Isover Вентфасад Верх; 2 – Утеплитель Isover Вентфасад Оптима;
3 – Кирпич керамический полнотелый; 4 – Цементно-песчаный раствор; 5 – МИФС2

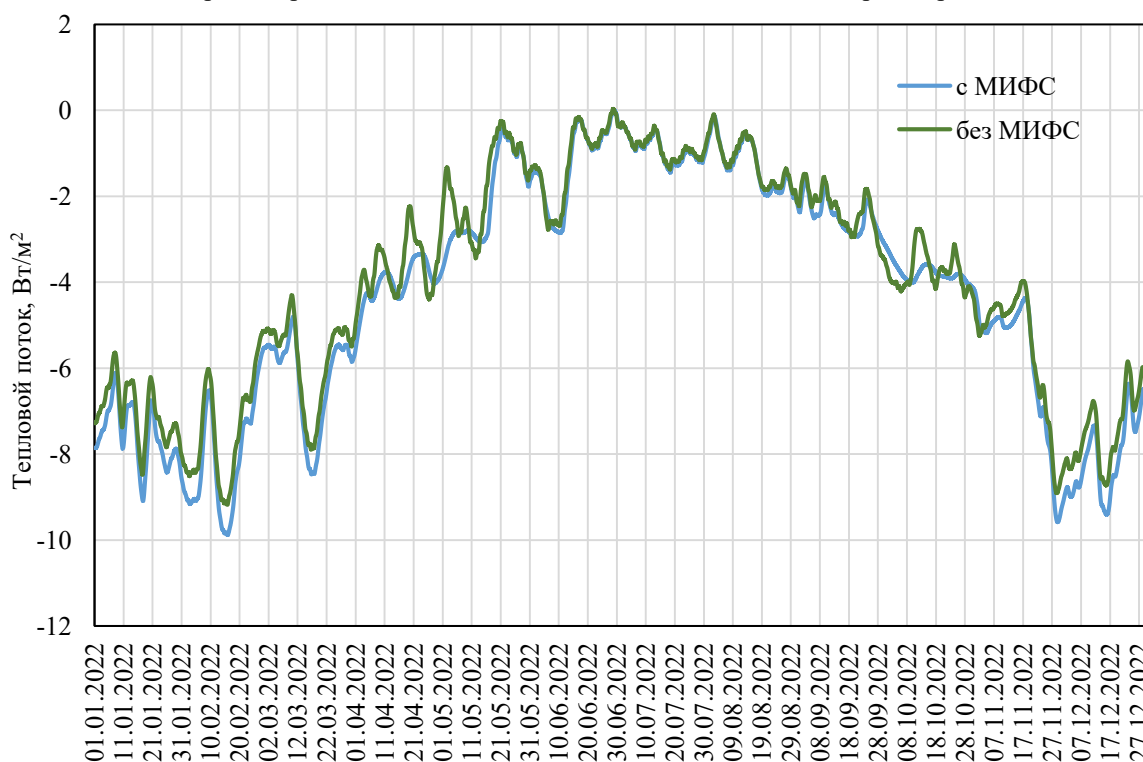


Рис. 10. Тепловые потоки за год

При этом на некоторых участках расчетного времени тепловые потоки, направленные из помещения наружу, через стену с МИФС меньше. Дольше всего данный эффект непрерывно сохраняется с 27 сентября по 7 октября, что соответствует декаде с наибольшим числом переходов через 0 °С. Также с начала апреля по середину мая и с конца сентября до начала ноября в конструкции с МИФС наблюдается уменьшение амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены.

Выводы.

1. Выполнена верификация численного расчета фазовых переходов с учетом теплового гистерезиса. Все представленные в статье расчеты получены с использованием верифицированной модели.

2. Предложена методика выбора МИФС на основе частотного распределения температур за отопительный период. Установлено, что для города Красноярска наибольшей вероятностью повторения за отопительный период обладают температуры от 0 °С включительно до 1 °С.

3. Использование МИФС2 за 10 суток отопительного периода при толщине слоя 10 мм в качестве добавочного слоя снижает расход тепловой энергии относительно исходной конструкции на 13,7 %.

При увеличении толщины слоя МИФС2 до 15 мм наблюдается максимум уменьшения расхода тепловой энергии, по сравнению со стеной без МИФС, при условии одинаковой толщины конструкций (разница 8,5 %).

4. Использование материала с изменяющимся фазовым состоянием привело к уменьшению амплитуды колебаний теплового потока на внутренней поверхности стены общей продолжительностью 2,5 месяцев. Длительное снижение теплового потока за счет осуществления фазового перехода наблюдается только в определенный период времени, который соответствует максимальному числу переходов температуры наружного воздуха через 0 °С. В остальных случаях тепловой поток через конструкцию с МИФС, как правило, больше, т.к. теплопроводность выбранного МИФС выше теплопроводности минеральной ваты (в 5,3 раза). Таким образом, следует проводить дополнительные исследования, направленные на увеличение количества слоев МИФС, обладающих разными температурами фазового перехода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mehling H, Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer Science+Business Media.

Luxembourg, 2008. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9.

2. Liu K., Yuan Z.F., Zhao H.X., Shi C.H., Zhao F. Properties and applications of shape-stabilized phase change energy storage materials based on porous material support – A review // *Materials Today Sustainability*. 2023. No. 8 (21). 100336. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100336.

3. Lopez-Arias M., Francioso V., Velay-Lizancos M. High thermal inertia mortars: New method to incorporate phase change materials (PCMs) while enhancing strength and thermal design models // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 370, 130621. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130621.

4. Min H.-W., Kim S., Kim H. S. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. Pp. 749–762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.176.

5. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. No. 10. Pp. 2038–2046. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004.

6. Назиров Р.А., Тараненко Д.В., Веде П.Ю. Применение материалов с изменяющимся фазовым состоянием в ограждающих конструкциях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 2. С. 90–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105.

7. Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. No. 9 (6). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017700828.

8. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33, 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.

9. Федюхин А.В., Афанасьева О.В., Зайцев М.Д. Анализ перспектив применения материалов с фазовым переходом в строительных конструкциях // *Вестник МГСУ*. 2023. № 12 (18). С. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988.

10. Кузьмин Г.П., Куваев В.А. Результаты испытания устройства для управления температурным режимом помещений теплотой фазового перехода воды // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 8. С. 127–132.

11. Герасимова Е.А., Карауш С.А., Герасимова О.О. Стеновая панель здания с теплоаккумулирующей вставкой для эксплуатации в суровой климатической зоне // *Construction*

and Geotechnics. 2022. № 2 (13). С. 44–54. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04.

12. Амер А.Э., Рахмани К., Лебедев В.А. Выбор материалов с фазовым переходом с использованием метода анализа иерархий (МАИ) // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 6 (96). Ч. 1. С. 35–48. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.006.

13. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer. Cham, 2015. 271 p. DOI: 10.1007/978-3-319-14286-9.

14. Biswas K., Shukla Y., Desjarlais A., Rawal R. Thermal characterization of full-scale PCM products and numerical simulations, including hysteresis, to evaluate energy impacts in an envelope application // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 138. Pp. 501–512. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.090.

15. Мажукин В.И., Королева О.Н., Шапранов А.В., Алексашкина А.А., Демин М.М. Молекулярно-динамическое моделирование термического гистерезиса золота // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 81. С. 1–11. DOI: 10.20948/prepr-2021-81.

16. Lu D., Xu X., Zhang X., Xie W., Gao Y. Study on Influencing Factors of Phase Transition

Hysteresis in the Phase Change Energy Storage // Materials. 2022. No. 15 (8). 2775. DOI: 10.3390/ma15082775.

17. Barz T., Buruzs A., Andreas Sommer. Major and minor hysteresis loops in the enthalpy-temperature and phase fraction-temperature diagrams of solid/liquid phase change materials // International Journal of Engineering Science. 2023. Vol. 191. 103913. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2023.103913.

18. Бараненко А.В., Кузнецова П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 6 (18). С. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000.

19. Mauder, T. Robustness analysis of various approaches to modeling of the phase change front propagation // ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2017. Pp. 1–9. DOI: 10.1115/IMECE2017-71372.

20. Lorina D., Mahanwar P.A. A review on organic phase change materials and their applications // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2021. No. 5 (9). Pp. 268–284. DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i09.045.

Информация об авторе

Тараненко Дмитрий Васильевич, аспирант кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости. E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79.

Поступила 06.01.2025 г.

© Тараненко Д.В., 2025

Taranenko D.V.

Siberian Federal University

E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF WALLS BY INCLUDING PHASE CHANGE MATERIALS IN THEIR STRUCTURE

Abstract. Phase changing materials (PCMs) are of great interest due to their significant advantages in increasing energy efficiency, maintaining thermal comfort in buildings, and helping to reduce environmental pollution. Research into the energy-saving capacity of building structures with PCMs has been carried out mainly by foreign authors and considers buildings located in warm climates.

This paper presents the results of a numerical study of external walls with PCM in accordance with the requirements of domestic standards for thermal protection for the continental climate of Krasnoyarsk. Preliminary verification of the numerical implementation of the calculation algorithm was carried out, which takes into account the presence of a mismatch between the melting and crystallization temperatures of PCM (thermal hysteresis). The phenomenon of thermal hysteresis is not taken into account in many studies. Meanwhile, the use of simplified algorithms that do not include hysteresis can lead to significant inaccuracies. In this regard, the hysteresis effect was taken into account in the study calculations. A method for selecting PCM for use in external enclosing structures is proposed. The wall structure with the selected PCM resulted in a decrease in thermal energy by 13.7% relative to the original structure during the heating period, and by 8.5% relative to

the original structure with the same thickness of the structures. A conclusion is made about the prospects of using several PCM layers with different phase transition temperatures.

Keywords: *phase change materials, phase transition, energy saving, energy consumption, hysteresis, thermal energy storage, energy efficiency.*

REFERENCES

1. Mehling H, Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer Science+Business Media. Luxembourg, 2008. 308 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9
2. Liu K., Yuan Z.F., Zhao H.X., Shi C.H., Zhao F. Properties and applications of shape-stabilized phase change energy storage materials based on porous material support – A review. *Materials Today Sustainability*. 2023. No. 8 (21). 100336. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100336.
3. Lopez-Arias M., Francioso V., Velay-Lizancos M. High thermal inertia mortars: New method to incorporate phase change materials (PCMs) while enhancing strength and thermal design models. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 370, 130621. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130621.
4. Min H.-W., Kim S., Kim H. S. Investigation on thermal and mechanical characteristics of concrete mixed with shape stabilized phase change material for mix design. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. Pp. 749–762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.176.
5. Kuznik F., Virgone J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. No. 10. Pp. 2038–2046. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004.
6. Nazirov R.A., Taranenko D.V., Vede P.Yu. The use of materials with a changing phase state in building envelope structures [Primenenie materialov s izmenyayushchimsya fazovym sostoyaniem v ograzhdayushchih konstrukciyah]. *Building and Reconstruction*. 2019. No. 2. Pp. 90–105. DOI: 10.33979/2073-7416-2019-82-2-90-105. (rus)
7. Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. No. 9 (6). Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017700828.
8. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 33. 101913. DOI: 10.1016/j.est.2020.101913.
9. Fedyukhin A.V., Afanaseva O.V., Zaitsev M.D. Analysis of the prospects of phase change materials in building structures [Analiz perspektiv primeneniya materialov s fazovym perekhodom v stroitel'nyh konstrukciyah]. *Vestnik MGSU*. 2023. No. 18 (12). Pp. 1977–1988. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1977-1988. (rus)
10. Kuzmin G.P., Kuvaev V.A. Test results of a device for controlling the temperature regime of premises by the heat of the phase transition of water [Rezultaty ispytaniya ustrojstva dlya upravleniya temperaturnym rezhimom pomeshchenij teplotoj fazovogo perekhoda vody]. *Advances in current natural sciences*. 2022. No. 8. Pp. 127–132. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04. (rus)
11. Gerasimova E.A., Karaush S.A., Gerasimova O.O. Building wall panel with heat storage insert for use in harsh climatic zones [Stenovaya panel' zdaniya s teploakkumuliruyushchej vstavkoj dlya ekspluatatsii v surovoj klimaticheskoy zone]. *Construction and Geotechnics*. 2022. Vol. 13. No. 2. Pp. 44–54. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.04. (rus)
12. Amer A.E., Raxmani K., Lebedev V.A. Selection of Materials with Phase Transition Using the Hierarchy Analysis Method (Ham) [Vybor materialov s fazovym perekhodom s ispol'zovaniem metoda analiza ierarhij (MAI)]. *International Research Journal*. No. 6 (96). 2020. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.006. (rus)
13. Kosny J. PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Springer. Cham, 2015. 271 p. DOI: 10.1007/978-3-319-14286-9.
14. Biswas K., Shukla Y., Desjarlais A., Rawal R. Thermal characterization of full-scale PCM products and numerical simulations, including hysteresis, to evaluate energy impacts in an envelope application. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 138. Pp. 501–512. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.090.
15. Mazhukin V.I., Koroleva O.N., Shapranov A.V., Aleksashkina A.A., Demin M.M. Molecular dynamic modeling of thermal hysteresis of gold [Molekulyarno-dinamicheskoe modelirovanie termicheskogo gisterezisa zolota]. *Keldysh Institute PREPRINTS*. 2021. No. 81. Pp. 1–11. DOI: 10.20948/prepr-2021-81. (rus)
16. Lu D., Xu X., Zhang X., Xie W., Gao Y. Study on Influencing Factors of Phase Transition Hysteresis in the Phase Change Energy Storage. *Materials*. 2022. No. 15 (8). 2775. DOI: 10.3390/ma15082775.
17. Barz T., Buruzs A., Andreas Sommer. Major and minor hysteresis loops in the enthalpy-temperature and phase fraction-temperature diagrams of solid/liquid phase change materials. *International Journal of Engineering Science*. 2023. Vol. 191. 103913. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2023.103913.

18. Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation [Primenenie veshchestv s fazovymi perekhodami dlya akkumulirovaniya teplovoj energii]. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2018. 6 (18). Pp. 990–1000. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000. (rus)

19. Mauder, T. Robustness analysis of various approaches to modeling of the phase change front propagation. ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2017. Pp 1–9. DOI: 10.1115/IMECE2017-71372.

20. Lorina D., Mahanwar P.A. A review on organic phase change materials and their applications. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2021. No. 5 (9). Pp. 268–284. DOI: 10.33564/IJEAST.2021.v05i09.045.

Information about the author

Taranenko, Dmitry V. Postgraduate student. E-mail: dmitrij_taranenko@mail.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79.

Received 06.01.2025

Для цитирования:

Тараненко Д.В. Повышение энергоэффективности стен за счёт включения в их конструкцию материалов с изменяющимся фазовым состоянием // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29

For citation:

Taranenko D.V. Increasing the energy efficiency of walls by including phase change materials in their structure. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 18–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-18-29

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-30-44

**Спирин П.П.*

Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства (ООО «НИИ ПГ»)
Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства
и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России)

**E-mail: pavelsp@list.ru*

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕРРИТОРИЙ ВЫСОКОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ)

Аннотация. Выбор оптимальной модели градостроительного освоения любой территории является обязательным условием построения эффективной системы природопользования. Градостроительное освоение нетронутых хозяйственной деятельностью первозданных участков природы накладывает особую ответственность при подготовке проектных решений любого уровня градостроительной документации. В настоящей статье на примере Республики Алтай – регионе высокой экологической ответственности, обоснованы методы эколого-ориентированного территориального планирования и градостроительного проектирования с целью построения оптимальной модели планировочного каркаса и достижения устойчивого развития территории. Предметом апробации указанных методов является территория Горно-Алтайской агломерации, многовекторное развитие которой позволяет установить причинно-следственные закономерности существующих градостроительных проблем и найти эффективные проектные решения. Автором с учетом урбоэкологического потенциала территории и демографической емкости природных ландшафтов определены предпочтительные в долгосрочной перспективе направления градостроительного развития агломерации, как основного ядра устойчивого (ноосферного) развития Республики Алтай. В качестве основной формы пространственной организации Горно-Алтайской агломерации предложены каркасные модели развития территории: опорный каркас расселения, природно-экологический, транспортный, историко-культурные каркасы. На основании проведенного исследования разработан механизм функционально-планировочной организации территории городского округа и муниципального района, как единой агломерационной системы. В качестве инструмента регулирования территориального развития Горно-Алтайской агломерации предлагается обобщенное функциональное зонирование, направленное на создание градостроительных условий для сбалансированного экономического и экологического развития территории, повышение качества жизни населения и сохранение уникальной социоприродной среды Алтая.

Ключевые слова: эколого-ориентированное планирование, Горно-Алтайская агломерация, устойчивое развитие, ноосферное развитие, территории высокой экологической ответственности, модель градостроительного развития

Введение. Республика Алтай – уникальный регион Российской Федерации, пространственное и градостроительное развитие которого определено физико-географическим расположением в самом центре Евразийского континента, удивительной по красоте природой гор Алтая, богатой культурой и нетронутой цивилизацией самобытностью проживающих здесь народов. Площадь республики составляет 92,9 тыс. км² (0,54 % территории Российской Федерации), при этом 65 % ее территории занимают предгорные и горные леса лесного фонда и земель особо охраняемых природных территорий, имеющие высокую экологическую ценность в планетарном масштабе. Благодаря своему географическому положению, экологическому состоянию, уникальному сосредоточению природного и культурного наследия и возрастающему в последние годы потоку туристов, Республика Алтай привлекательна для инвестиций в развитие туризма и рекреационной деятельности.

Стратегией социально-экономического развития Сибирского федерального округа до 2035 года, в состав которого входит Республика Алтай, республике определена роль одного из рекреационных центров Российской Федерации, и отмечено, что в регионе имеются широкие возможности для создания бальнеологических центров – курортов и санаториев, реализуются крупные инвестиционные проекты в сфере туризма, в том числе развитие всесезонного курорта «Манжерок» (Майминский район) [1].

Республика Алтай располагает богатейшим природно-рекреационным потенциалом. Стратегией социально-экономического развития Республики Алтай на период до 2035 года определена миссия региона в следующей формулировке «Горный Алтай – территория ноосферного развития» [2]. Действительно, Республика Алтай согласно национальному экологическому рейтингу по итогам 2024 года занимает первое место, обладает высоким природоохранным потенциалом

и имеет достаточно высокий социально-экологический индекс развития¹, сохраняя свою идентичность и гармонию человека и природы, сложившуюся веками.

В северной части республики, граничащей с Алтайским краем, на базе исторически сложившейся крупной групповой системы расселения с центром в городе Горно-Алтайск, формируется городская Горно-Алтайская агломерация, где в настоящее время сосредоточено 45,2 % численности населения всего региона (в том числе все городское население), а плотность населения многократно выше значений этого показателя в среднем по республике².

Проблематика исследуемой территории связана с противоречием между интенсивной инвестиционной деятельностью и перспективами ее развития и урбоэкологической емкостью территории, превышение которой чревато деградацией природных ландшафтов.

Целью настоящего исследования является обоснование оптимальной модели эколого-ориентированного градостроительного развития Горно-Алтайской агломерации, как наиболее перспективной территории экономического роста Республики Алтай при максимальном сохранении уникального природно-рекреационного и историко-культурного потенциала территории.

Объект исследования: территории городского округа «Город Горно-Алтайск» и Майминского района Республики Алтай.

Методология исследования основана на использовании системного научно-методического подхода к сбалансированному пространственному развитию Горно-Алтайской агломерации, как опорного центра Республики Алтай. Использование системного научно-методического подхода необходимо для выявления общих характеристик и закономерностей пространственного развития территории, с учетом которых должны приниматься градостроительные решения. Предложения по градостроительному развитию территории агломерации разработаны с учетом основных принципов законодательства о градостроительной деятельности [3] и направлены на обеспечение сбалансированного учета экологических, экономических, социальных и иных факторов при осуществлении градостроительной деятельности. При этом учет специфики социально-экономического развития и природопользования, как необходимый фундаментальный

принцип градостроительной политики [4], рассматривается в качестве основы устойчивого, экономически эффективного и экологически безопасного развития Республики Алтай.

Основное исследование. Важным аспектом развития территории является опорный каркас региональной системы расселения, формируемый на основе транспортных связей урбанизированных центров с производственными, сельскохозяйственными и рекреационными центрами. В каждом из субъектов Российской Федерации расположен свой центр – узел системы расселения, имеющий прямые транспортные связи с другими такими же узлами регионального уровня [5].

В настоящее время в Республике Алтай сложилась ассиметричная система расселения, что в первую очередь связано с неравномерностью освоения территории, особенностями орографии и рельефа. Концентрация населения отмечается в северной части республики, где и расположен единственный город, административный центр республики г. Горно-Алтайск (рис. 1).

Горно-Алтайская агломерация, включающая городской округ «Город Горно-Алтайск» и окружающие его сельские поселения Майминского района, рассматривается как опорный центр расселения Республики Алтай, приоритетное развитие которого будет способствовать достижению национальных и региональных целей социально-экономического развития. Город Горно-Алтайск, а на перспективу и с. Майма, формируют ядро агломерации, вокруг которого увеличивается концентрация населения, производственной и научной деятельности, административных ресурсов и т.д. Как показывает зарубежный и отечественный опыт, агломерация как материально-пространственная форма организации социально-экономических систем становится всё более востребованным инструментом градостроительного развития [6]. В качестве приоритета пространственного развития агломерации определено сохранение ее экологического потенциала: уникальных горных и долинных ландшафтов, озер, зон питания горных рек, родников, святых источников и др. При этом приоритет экологического развития связан с социальным приоритетом повышения ценности человеческой жизни и здоровья, определяя направления использования природного потенциала территорий для развития туризма, оздоровительного отдыха, проживания коренных малочисленных народов.

¹ Экологический рейтинг субъектов Российской Федерации URL: <https://greenpatrol.ru/stranica-dlya-obshchego-reytinga> (дата обращения 15.02.2025).

² По расчетным данным плотность населения в городе Горно-Алтайске 672 чел./км², в Майминском районе 24,5 чел./км², в среднем по региону 2,27 чел./км².

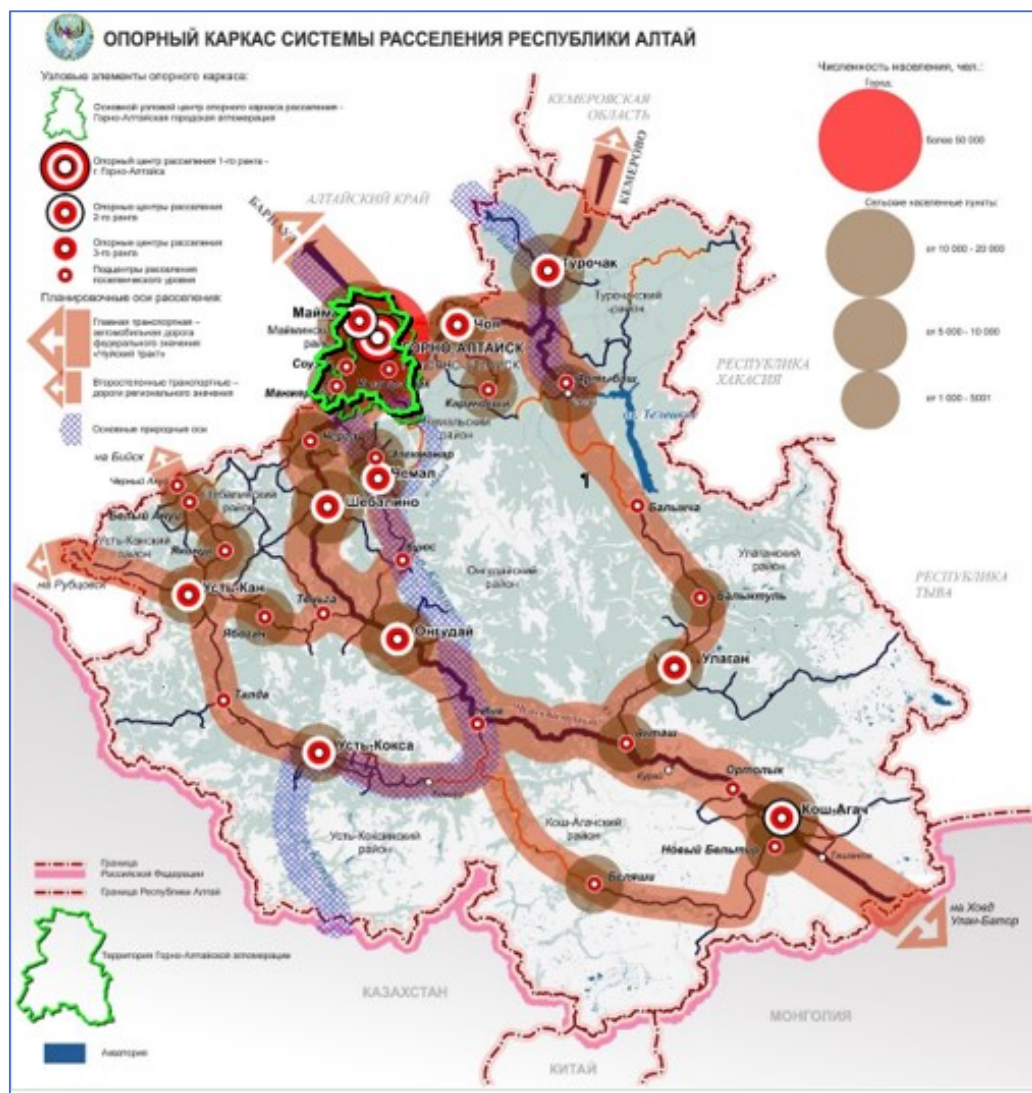


Рис. 1. Опорный каркас расселения Республики Алтай

Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития (мастер-план) Горно-Алтайской агломерации», доклад Главе Республики Алтай, март 2024 г.

Каркас расселения населения Горно-Алтайской агломерации сформировался как система сельских населенных пунктов, ядром которой является город Горно-Алтайск и с. Майма. Главные планировочные оси расселения: природная ось р. Катунь, транспортная – автомобильная дорога федерального значения Р256 Чуйский тракт. К второстепенным осям расселения отнесены: природная ось р. Майма и региональные автомобильные дороги. Для укрепления агломерационных связей концепцией предлагается формирование новой широтной планировочной оси, связывающей центры сельских поселений между собой и с центром (рис. 2).

Большая часть населения агломерации (69,3 %) является городским и проживает на территории города Горно-Алтайск. Численность населения самого города растет незначительно в силу условий рельефа – у города отсутствуют внутренние территориальные ресурсы для

дальнейшего развития (размещения производства, жилой и социальной инфраструктуры и т.д.) [7]. В то же время заметно увеличивается численность населения ближайших к городу населенных пунктов с. Майма, пос. Алфёрово, с. Кызыл-Озёк. Таким образом, происходит постепенное увеличение концентрации населения в зоне административного центра региона в пределах часовой транспортной доступности от ядра агломерации (ближний пояс агломерации), включающий села Кызыл-Озёк, Союзга, Манжерок. Именно эти территории наиболее привлекательны для инвесторов, что подтверждается расположением инвестиционных площадок, подвержены наибольшему антропогенному воздействию. К зоне дальнего пригородного пояса агломерации отнесены Усть-Мунинское сельское поселения и периферийные территории и населенные пункты Бирюлинского сельского поселения. Для этих

территорий характерен высокий уровень залесенности и биоразнообразия, экстенсивный характер освоения.

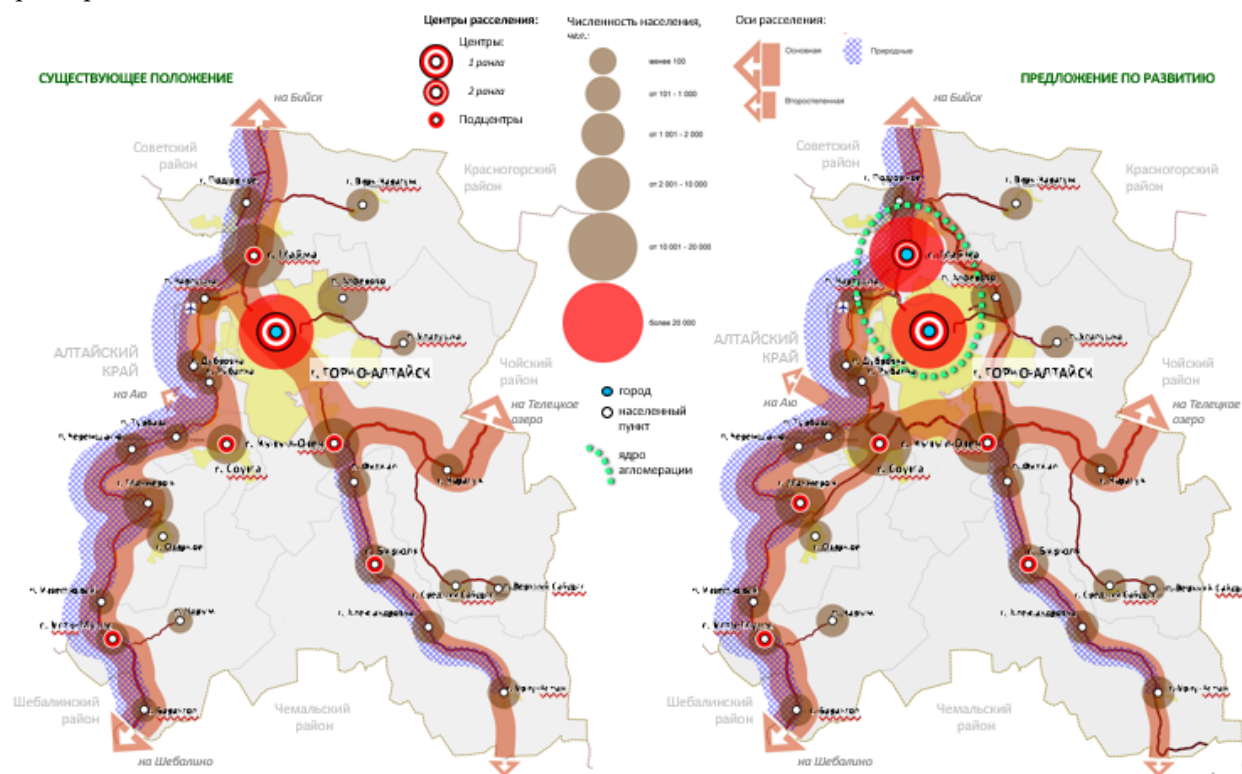


Рис. 2. Схема расселения в границах Горно-Алтайской агломерации

Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития (мастер-план)

Горно-Алтайской агломерации», доклад Главе Республики Алтай, март 2024 г.

Межмуниципальные и межрегиональные связи Горно-Алтайской агломерации обеспечиваются воздушным и автомобильным транспортом, инфраструктура которых уже на данный момент отличается высокой загруженностью, существенно превосходящую расчетную пропускную способность. [8] Перспективное развитие транспортной инфраструктуры Горно-Алтайской агломерации во многом определяется активным инвестиционным ростом, развитием межрегиональных и межмуниципальных агломерационных связей. Горно-Алтайск, как центр агломерации, в ареале своего влияния трансформирует сеть федеральных и региональных автомобильных дорог в обеспечивающую транспортное сообщение по всем внешним направлениям. В исследовании выделены следующие оси развития:

- Главная планировочная ось вдоль реки Катунь и Чуйского тракта;
- Горно-Алтайск – Бирюля – Урлу-Аспак – Чемам – Чемам;
- Широтная ось – Чуйский тракт-Телецкий тракт – с. Союзга – с. Кызыл-Озёк – с. Карасук;
- Новая планировочная ось параллельно Чуйскому тракту: Горно-Алтайск – Союзга – с. Озерное (Манжерок).

Горно-Алтайская городская агломерация территориально и градостроительно связана с Алтайским районом Алтайского края, граница между ними проходит по р. Катунь: на левом берегу – Алтайский край, на правом берегу – Республика Алтай. По долине р. Катунь сформирована единая туристская ось, вдоль которой расположены зоны отдыха и крупнейшие туристские и курортные комплексы, связанные между собой сетью автомобильных дорог и мостовыми сооружениями. В силу сформировавшихся транспортных связей и туристических зон на левом и правом берегу р. Катунь возникает необходимость формирования объединенных туристско-рекреационных систем межрегионального уровня и «преодоления» административных границ.

Рост численности населения, строительство объектов транспортной и инженерной инфраструктуры и усиление интенсивности рекреационной деятельности могут привести к развитию негативных экологических изменений на территории Горно-Алтайской агломерации. Ограничительным фактором развития градостроительной деятельности является сохранение и повышение качества окружающей среды, устойчивости природных комплексов [9].

Важным инструментом обеспечения экологической и социально-экономической устойчивости территориальных систем является природно-экологический каркас, определяющий режимы использования природных и природно-антропогенных территорий и объектов. В качестве структурных элементов природно-экологического каркаса на территории Майминского района и города Горно-Алтайск выделены:

- ключевые территории (ядра) – особо охраняемые природные территории федерального (дендрологический парк) и регионального значения (площадные памятники природы);

- предлагаемый к созданию природный парк регионального значения на землях лесного фонда Манжерокского участкового лесничества (для сохранения ценных природных ландшафтов и комплексов, объектов археологического наследия, упорядочения рекреационного использования территории);

- экологические (транзитные) коридоры: водные объекты и их водоохранные зоны, водоразделы речных бассейнов, пути миграции диких животных;

- буферные территории: леса лесного фонда; леса на землях сельскохозяйственного назначения; лесопарковый зеленый пояс г. Горно-Алтайск (предлагается к выделению);

- зеленый фонд населенных пунктов: зеленые насаждения общего пользования, городские леса.

Для каждого из элементов природно-экологического каркаса действующими нормативными правовыми актами, преимущественно отраслевыми, установлены режимы использования (рис. 3).

Следует отметить, пространственная структура природно-экологического каркаса территории Горно-Алтайской агломерации включает основные функциональные элементы и природные оси регионального уровня, важные для поддержания экологического баланса не только на территории двух муниципальных образований, но и на всей территории Республики Алтай.

В наибольшей степени охраны нуждаются участки истоков рек на водоразделах, вершинные и привершинные леса. [10] Для сохранения средоформирующих и водоохранных функций этих территорий рекомендуется введение запрета на использование горных лесов в верховьях р. Майма (выше с. Александровка по течению), а также ее притоков Карасук, Сайдыс, Бирюля. С целью сохранения горных лесов водоразделов и

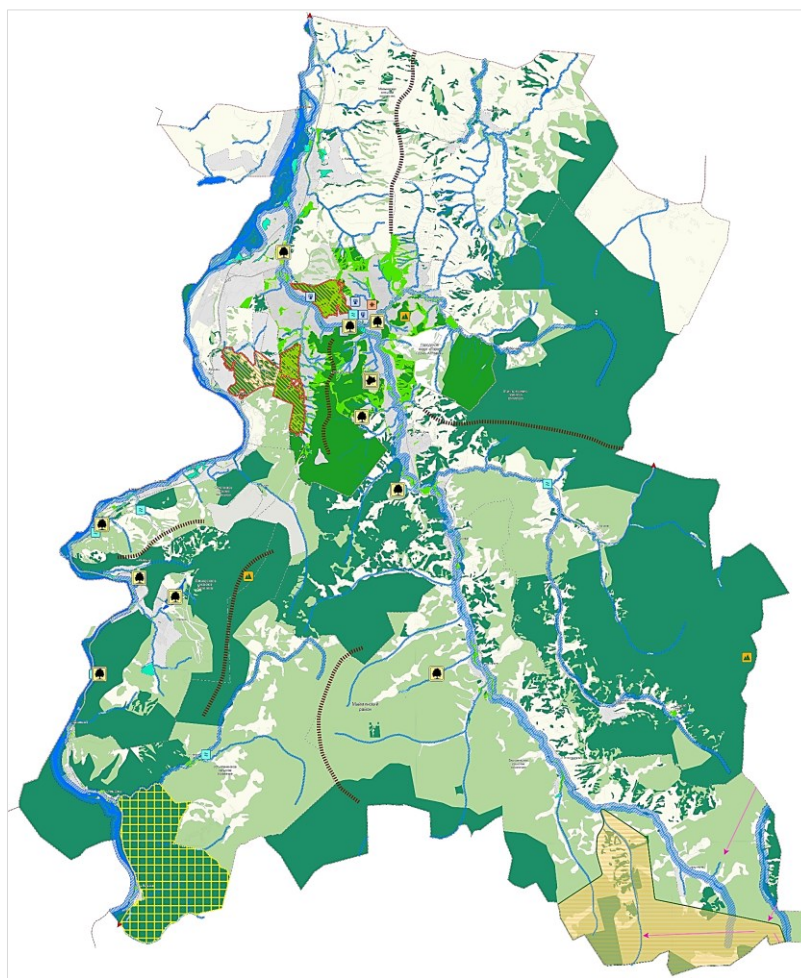
придолинных комплексов на территории Усть-Мушинского сельского поселения предлагается создание новой ООПТ регионального значения – природного парка.

Таким образом, специфика географического положения и лесорастительных условий определяет важные экосистемные функции и биоразнообразие лесов предгорий Алтая, при этом значительную средоформирующую функцию выполняют не только леса лесного фонда, но и леса на землях сельскохозяйственного назначения. Именно этим лесным комплексам необходимо обеспечение правовой защиты от вырубания при интенсивном развитии процессов урбанизации в центральной части агломерации.

Главной экологической задачей градостроительного развития территории становится ограничение хозяйственной деятельности человека в рамках специально выделенных и обоснованных территорий с определенным видом природопользования, не оказывающим критического воздействия на состояние природного каркаса. Решение данной задачи позволяет сохранить необходимые для обеспечения биологического разнообразия и экологического потенциала 50–60 % территории, не затронутой хозяйственной деятельностью.

В концепции пространственного развития Горно-Алтайской агломерации особое внимание уделено определению потенциальных возможностей градостроительного освоения рассматриваемой территории с учетом природоохранных ограничений. С целью обоснования возможностей развития агломерации и определения ограничений градостроительного развития было выполнено экспресс-исследование урбоэкологического потенциала расселения и установлена ориентировочная демографическая ёмкость прилегающих к Горно-Алтайску территорий Майминского района. Ориентировочный расчёт урбоэкологического потенциала территорий³ в планируемых границах Горно-Алтайской агломерации, включающей центр Майминского района с. Майма и населенные пункты – пригороды: Кызыл-Озёк, Карлушка, Алфёрово, Союзга, Манжерок показал возможность для расселения 150 тыс. чел. без существенной деградации природного ландшафта. [11] Это количество населения является показателем предельной демографической емкости природных территорий в границах исследуемой территории.

³ Расчет осуществлен канд. архитекторы П.В. Скрыбиным.



Ядра ПЭК-ООПТ		Экологические коридоры ПЭК	Буферные зоны ПЭК	Зеленый фонд населенных пунктов
	Дендрологический парк федерального значения	водные объекты	леса лесного фонда	озелененные территории общего пользования
		водоохранные зоны		
	Памятники природы регионального значения	водораздельные хребты	леса на землях сельскохозяйственного назначения	городские леса
	Природный парк регионального значения. Планируемый	зона охраны и пути миграции диких животных	лесопарковый зеленый пояс, предлагаемый к созданию	рекреационные зоны

Рис. 3. Схема природно-экологического каркаса

Источник: отчет о НИР по теме «Концепция пространственного развития (мастер-план) Горно-Алтайской агломерации», Санкт-Петербург, НИИ ПГ, 2023 г.

Развитие агломерации в современных условиях во многом зависит от притока инвестиций. Однако, как показал анализ, инвестиционная деятельность, направленная на получение максимальной прибыли, включает проекты, реализация которых на ограниченной по площади территории в долгосрочном периоде может привести к деградации природно-рекреационных ресурсов, снижению туристской привлекательности территории и, соответственно, туристского потока. Что, в конечном итоге, негативно отразится на социально-экономическом состоянии

муниципальных образований, входящих в состав агломерации.

В исследовании рассмотрены два альтернативных сценария пространственного развития агломерации (подход к формированию сценариев исходит из представлений о предпочтительных в долгосрочной перспективе направлениях развития):

- рыночный сценарий: направлен на удовлетворение интересов инвесторов в получении максимальной прибыли, концентрируется преимущественно на интенсивной застройке инвестиционных

площадок на территории сельских поселений Майминского района и г. Горно-Алтайск;

- эколого-ориентированный сценарий: направлен на максимальное сохранение природно-рекреационного потенциала территории, повышение качества городской среды. На основе демографической емкости территории произведена корректировка показателей инвестиционных проектов в части развития жилищного и рекреационного строительства (обосновано снижение показателей площади застройки и численности населения).

При этом, следует отметить, что пространственная политика реализации обоих сценариев предполагает активизацию инвестиционного развития агломерации, приоритет в развитии межмуниципальной социальной и инженерной инфраструктуры.

Различия в сценариях развития Горно-Алтайской агломерации определяются вариативностью значений роста численности населения и объемов жилищного строительства после 2035 года. При условии полной реализации заявленных инвестиционных проектов, численность постоянного населения возрастет до 180,6 тыс. человек, объем жилищного строительства по инвестиционным проектам составит 1881,5 тыс. м². В другом варианте, предполагающем частичную реализацию инвестиционных проектов, расчетная численность постоянного населения Горно-Алтайской агломерации увеличится до 151,3 тыс. человек, объем жилищного строительства по инвестиционным проектам составит 1182,9 тыс. м² [11].

В качестве целевого был выбран эколого-ориентированный сценарий пространственного развития агломерации, в основу которого заложен экосистемный подход [12] к использованию территориальных и других природных ресурсов, функциональному зонированию территории агломерации, учитывающий социокультурные, исторические, духовные и этнические особенности Республики Алтай, города Горно-Алтайск и Майминского района.

Территории Горно-Алтайска и Майминского района, расположенные на стыке гор, тайги и степей, обладают богатейшим историко-культурным потенциалом. На протяжении многих веков и тысячелетий эти территории являлись перекрёстком миграций древних племен, границей

расселения полукочевых и оседлых народов, контактной зоной различных культур, что нашло свое отражение в многочисленных археологических памятниках, относящихся к различным эпохам и этническим группам [13]. Составляющие историко-культурного каркаса исследуемой территории представлены: памятниками истории и культуры народов, проживающих на территории республики, памятниками архитектуры и монументального искусства, воинскими мемориалами и памятниками, объектами археологического наследия, сакральными местами (священными землями) и природно-культурными объектами коренного населения, нематериальным историко-культурным наследием, местами бытования народных художественных промыслов и ремёсел.

Стратегией государственной культурной политики на период до 2030 г. к ключевым факторам формирования духовно-нравственного фундамента страны отнесены вопросы «защиты традиционных российских духовно-нравственных ценностей, культуры и исторической памяти, сохранения исторического и культурного наследия». [14] Особенно важны эти вопросы для национальных республик и, в частности, республики Алтай.

Каркасный подход к изучению и созданию условий для сохранения историко-культурного наследия, используемый в работе, позволил определить специфику территориального размещения объектов культурного наследия, выделить узловые территории их сосредоточения и предложить градостроительные меры по его сохранению и популяризации среди местного населения и туристов, приезжающих из различных регионов страны.

В целях популяризации культурных и туристских возможностей территории, развития экономики культурного наследия концепцией пространственного развития предлагается:

- присвоение статуса городу: «Горно-Алтайск – историческое поселение регионального значения» (интегрирование политики охраны культурного наследия в систему общей градостроительной политики развития исторической городской среды);

- создание историко-археологического парка Республики Алтай (на основе ОКН федерального значения Майма-ХII) – в будущем музея археологии Республики Алтай.⁴ Данное предложение требует детальной проработки, начало которой

⁴ Создание культурного-просветительского комплекса (археологического парка) обосновано археологом С.М. Киреевым.

должна положить концепция организации археологического парка с перспективой создания на его основе в Майминском районе музея археологии Горного Алтая;

- отнесение Священных Мест коренного населения Республики Алтай к выявленным объектам культурного наследия, проведение государственной историко-культурной экспертизы по присвоению объектам данного вида категории достопримечательное место регионального значения.

Следует отметить, что город Горно-Алтайск до 2010 г. входил в перечень исторических городов. В 2010 г. утверждён перечень исторических поселений федерального значения, в который Горно-Алтайск не был включен. В целях сохранения и развития историко-культурного наследия, нематериального культурного достояния, повышения статуса города и развития туризма, предлагается формирование исторического квартала города.

Приоритетные направления инвестиционного развития Горно-Алтайской агломерации определены исходя из выбранной модели эколого-ориентированной организации пространства, как основного ядра устойчивого (ноосферного) развития Республики Алтай. К приоритетным отраслям экономики относятся неэнергоёмкие виды экономической деятельности регенеративной, рекреационной и креативной направленности, такие как туризм, санаторно-курортная деятельность, органическое сельское хозяйство, культура, деятельность в области информационных и цифровых технологий и др.

Векторы развития Горно-Алтайской агломерации:

1. Реализация функции «Визит-центра» Горного Алтая, развитие туризма.

2. Развитие агропромышленного комплекса на базе органического сельского хозяйства.

3. Развитие инновационного производства, деятельность в области информационных и цифровых технологий.

Реализация основной функция туристического «Визит-центра» Горного Алтая: Территория агломерации является ключевой точкой притока туристского потока в регионе, в связи с чем первоочередное внимание должно быть направлено на:

- формирование комплекса туристских услуг, в том числе путем строительства или модернизации действующих в настоящее время объектов круглогодичного функционирования до

уровня 3 звезды;

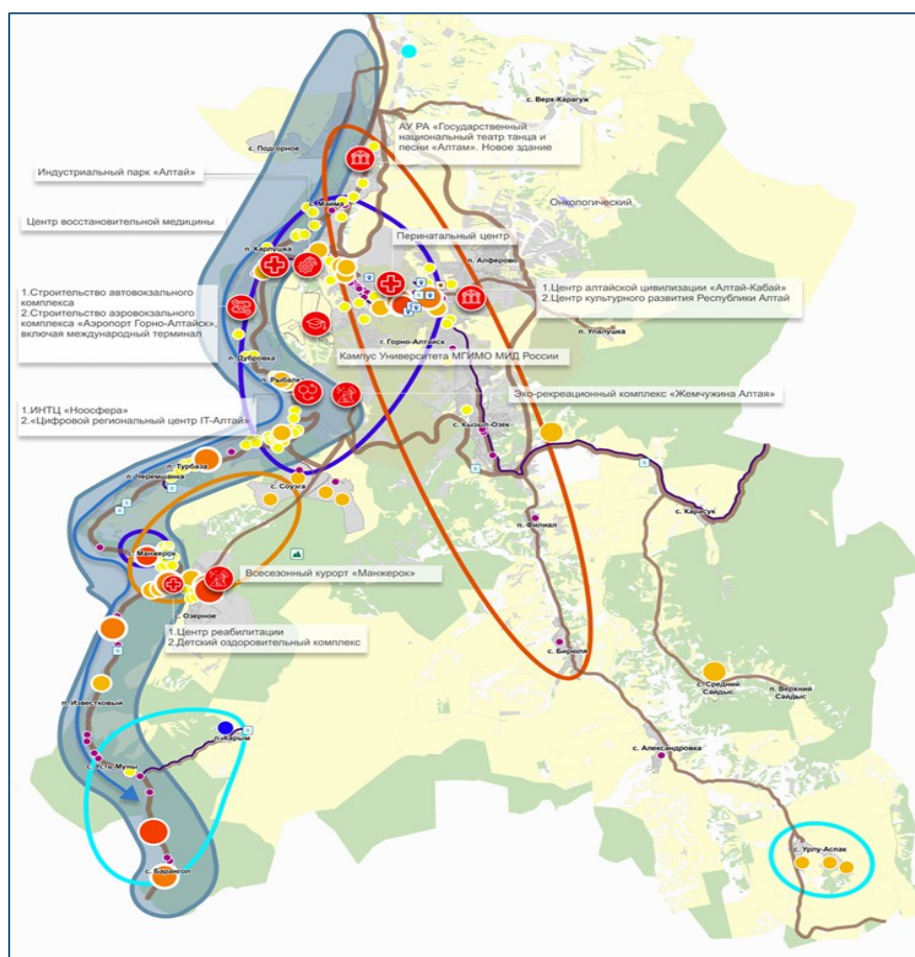
- строительство, реконструкцию и модернизацию транспортной и инженерной систем, как базовых условий развития экономики и туризма в частности;

- развитие сопутствующих туризму отраслей (производство готовой для реализации продовольственной продукции на основе местного сельскохозяйственного сырья).

Общим приоритетным направлением развития туризма в Горно-Алтайской агломерации является комплексное развитие туристских территорий, включая развитие туристской инфраструктуры, коммунальной и транспортной инфраструктуры, объектов показа и других объектов индустрии туризма, благоустройство туристских территорий в целях создания конкурентоспособного туристского продукта (рис. 4).

Самым высоким потенциалом комплексного развития обладает территория города Горно-Алтайск, площадки «Большая Майма» и «Жемчужина Алтая». При этом рациональное использование территориальных ресурсов должно быть направлено на сохранение градостроительной уникальности территории, обеспечение оптимальной пространственной и функциональной ее организации, сбалансированного экологического и экономического развития, повышение инвестиционной и туристской привлекательности Горно-Алтайской агломерации и Республики Алтай. Включение в градостроительное проектирование вопросов природной устойчивости, социальной целесообразности и экономической эффективности возможных планировочных решений, как отмечает доктор архитектуры, профессор С.Д. Митягин, становится необходимой методологической задачей совершенствования всей градостроительной деятельности – от обоснований до реализации [15].

В качестве инструмента регулирования территориального развития агломерации предлагается использовать укрупненное функциональное зонирование территории, в результате которого определяются границы зон преимущественного использования. Функциональное зонирование, согласно законодательным нормам, необходимо для развития методической базы проектной градостроительной деятельности, может рассматриваться как инструмент обеспечения социальных, экономических и экологических условий устойчивого функционирования любых административно-территориальных единиц независимо от их физических параметров [16].



- Развитие горнолыжных курортов с. Манжерок, с. Союзга;
- Развитие этнокультурных центров г. Горно-Алтайск, с. Майма, с. Бирюля
- Развитие центров оздоровительного туризма г. Горно-Алтайск, с. Манжерок
- Развитие инфраструктуры водного туризма (р. Катунь)
- Развитие центров экотуризма (с Усть-Муны, с. Барангол, с. Урлу-Аспак)
- Водные туристские маршруты
- Пешеходные туристские маршруты
- ● ● ● Гостиницы

Рис. 4. Развитие туризма и туристской инфраструктур

Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития (мастер-план) Горно-Алтайской агломерации, доклад Главе Республики Алтай, март 2024 г.

В концепции пространственного развития на основе эколого-ориентированного подхода разработано укрупненное функциональное зонирование территории Горно-Алтайской агломерации, включающей городской округ и муниципальный район, развитие которых осуществляется по единому сценарию. Данное зонирование направлено на обеспечение градостроительных

условий для реализации инвестиционных проектов по развитию жилищного и рекреационного строительства в соответствии с демографической ёмкостью территории, развитию инфраструктурных объектов, зон отдыха и туризма, сохранение ландшафтных комплексов и объектов, формирующих природно-экологический каркас, развитие системы озелененных территорий общего поль-

зования. В результате укрупненного функционального зонирования определены территории, перспективные для того или иного вида функционального использования (рис. 5).

Развитие жилой зоны предусматривается практически во всех населенных пунктах согласно утвержденным генеральным планам. Концепцией предлагается увеличение жилой зоны

среднеэтажной, малоэтажной и индивидуальной застройки в с. Майма и в с. Союзга в районе новой площадки «Верхняя Союзга». В г. Горно-Алтайск рекомендуется реконструкция индивидуальной жилой застройки, освоение территорий комплексного развития, развитие малоэтажной застройки.

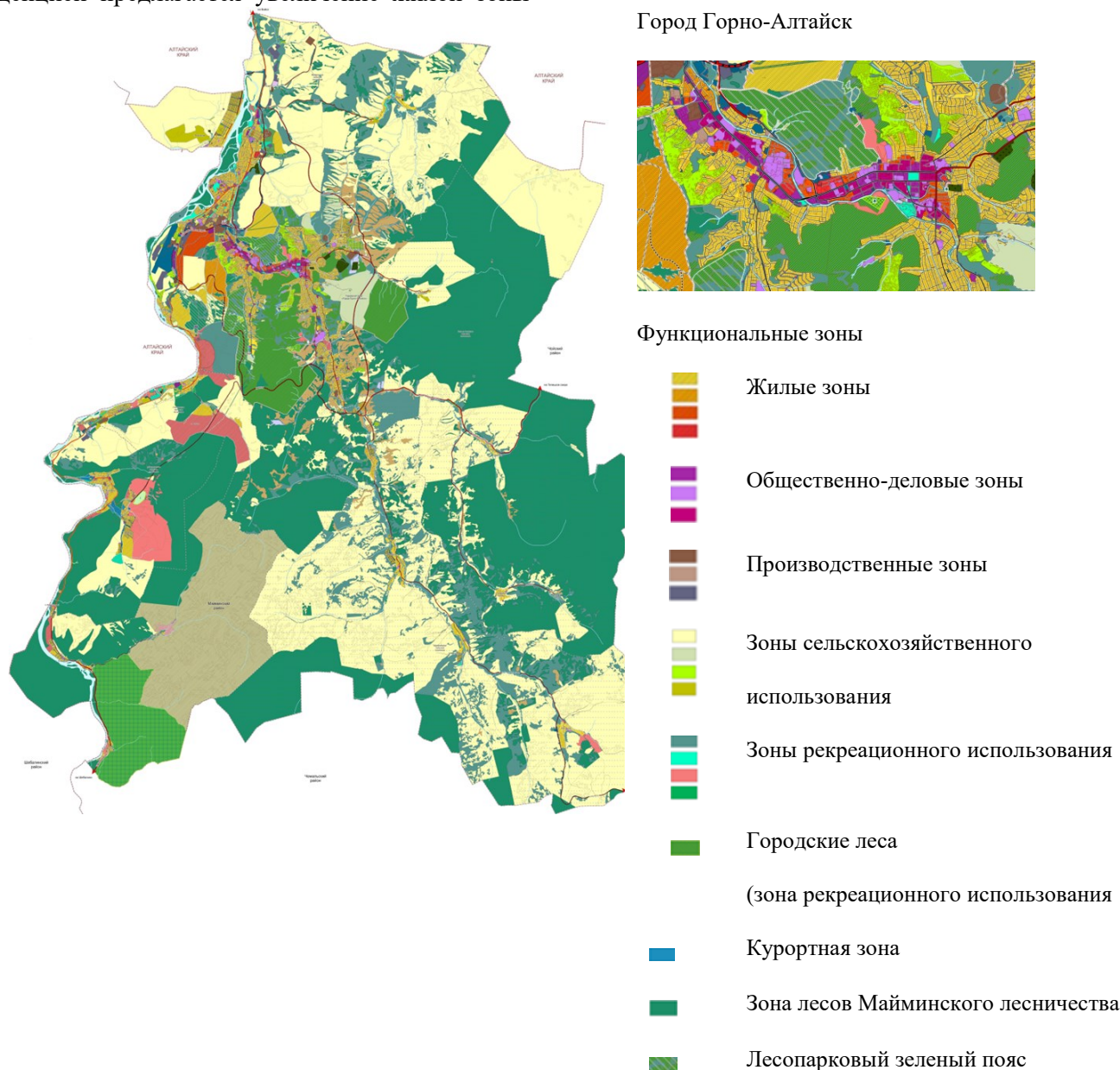


Рис. 5. Укрупненное функциональное зонирование Горно-Алтайской агломерации
 Источник: Презентация П.П. Спирина «Концепция пространственного развития (мастер-план) Горно-Алтайской агломерации», доклад Главе Республики Алтай, март 2024 г.

Общественно-деловая застройка получает наибольшее развитие в населенных пунктах вдоль автомобильной дороги Чуйский тракт, в районе аэропорта, а также с Майма и в с. Союзга. Самая крупная зона общественно-деловой застройки предусматривается на территории «Жемчужина Алтая». В г. Горно-Алтайск разви-

тие общегородского центра включает размещение общереспубликанских объектов, в том числе центра алтайской цивилизации «Алтай – Кабай» и др. объекты. Одно из перспективных направлений развития города – выделение исторического центра города, преобразование коммунальных зон на окраинах города.

Рекреационные зоны получают развитие с учетом прогнозируемого увеличения численности постоянного населения и туристских потоков. Развитие рекреационных зон предусматривается как в городе Горно-Алтайск, так и в сельских населённых пунктах Майминского района, в с. Манжерок, в с. Союзга и др. Практически в каждом населённом пункте планируется развитие зон отдыха, с приоритетом в с. Союзга и с. Озерное, где продолжается строительство объектов инфраструктуры горнолыжного комплекса «Манжерок». В функционально-планировочной организации территории города Горно-Алтайск выделяется природно-рекреационный каркас, формируемый парками и садами, набережными вдоль р. Майма, городскими лесами, памятниками природы регионального значения, лесопарковым зеленым поясом, пешеходными туристскими маршрутами.

Зона сельскохозяйственного использования вне границ населённых пунктов представлена преимущественно пашнями, сенокосами и пастбищами с лесами на склонах гор и требует особых мер сохранению этих территорий, которые довольно часто используются не по целевому назначению.

Зона лесов имеет преобладающее распространение на территории городской агломерации и формирует пригородный пояс городской агломерации с экстенсивными формами освоения территории.

Производственная зона развивается преимущественно в г. Горно-Алтайск. При планировочной организации территории учитывается развитие зоны аэропорта Горно-Алтайска, автомобильных дорог федерального, регионального и местного значения, объектов инженерной инфраструктуры.

Предложенный вариант пространственного развития, несмотря на установленные рамки антропогенной нагрузки, предполагает привлечение инвестиций и новое строительство. Создание градостроительных условий для реализации крупных инвестиционных проектов, а также развития малого бизнеса, позволит повысить экономический потенциал территории, будет способствовать созданию новых рабочих мест, росту благосостояния и уровня жизни местного населения.

Выводы.

1. Горно-Алтайская агломерация, включающая городской округ Горно-Алтайск и сельские поселения Майминского района Республики Алтай, представляет собой сложную и одновременно единую территориальную, природно-ландшафтную, социально-экономическую и

культурно-историческую систему, пространственная организация которой направлена на обеспечение экономической и экологической устойчивости территории. В качестве приоритета пространственного развития агломерации определено сохранение ее экологического потенциала, как основы устойчивого развития – «Горный Алтай – территория ноосферного развития».

2. Основные формы пространственной организации агломерации – каркасные модели развития территории: опорный каркас расселения, природно-экологический, транспортный, историко-культурные каркасы. Важным инструментом обеспечения экологической и социально-экономической устойчивости территориальных систем является природно-экологический каркас, определяющий режимы использования природных и природно-антропогенных территорий и объектов. Историко-культурный каркас определяет специфику территориального размещения объектов культурного наследия, обосновывает выделение исторического квартала г. Горно-Алтайск.

3. Потенциальные возможности градостроительного освоения территорий ограничены демографической емкостью природных ландшафтов, которая составляет для исследуемой территории 150 тыс. чел – это количество населения возможно для расселения без существенной деградации природного ландшафта (современная численность населения 95,9 тыс. чел). При этом развитие сельских периферийных территорий городской агломерации состоит в поддержке и защите ценных экосистем, сохранении рекреационного потенциалов лесов, развитии эколого-ориентированного сельского хозяйства.

4. Сценарный подход позволяет выбрать предпочтительные в долгосрочной перспективе направления градостроительного развития. В качестве альтернативных сценариев рассмотрены: рыночная модель (неограниченное инвестиционного освоения территории) и модель эколого-ориентированной организации пространства. Различия в сценариях развития определяются вариативностью таких градостроительных показателей, как прогнозная численность населения, объемы жилищного строительства, инженерной нагрузки. К реализации определен эколого-ориентированный вариант, направленный на сохранение уникальности территории, ее инвестиционной привлекательности как туристско-рекреационного центра страны.

5. В качестве целостного развития территории, как единой агломерационной системы, и регулирования ее территориального развития предлагается укрупненное функциональное зонирование агломерации. Зонирование территории не

ограничивается границами отдельного муниципального образования, а распространяется на всю территорию, обеспечивая градостроительные условия для устойчивого развития агломерации в целом с учетом интересов каждого из муниципальных образований в ее составе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение правительства Российской Федерации от 26 января 2023 г. № 129-р Москва «Об утверждении стратегии социально-экономического развития сибирского федерального округа до 2035 года». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406164313/> (дата обращения 12.02.2025).
2. Постановление Правительства Республики Алтай от 13.03.2018 № 60 (ред. от 29.03.2022) «О Стратегии социально-экономического развития Республики Алтай на период до 2035 г.». URL: <https://base.garant.ru/44360570/> (дата обращения 12.02.2025).
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 26.12.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/13379792896b38e59e5c4b5832f1b7ce8338a1d00/ (дата обращения 12.02.2025).
4. Митягин С.Д. Методологические основы градостроительной политики и базовые положения Государственной стратегии пространственной организации Российской Федерации // Зодчий 21 век. 2012. № 1. С. 8–13.
5. Скрыбин П.В. Проблематика и направление градостроительного развития рекреационной среды Горного Алтая // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 95–102.
6. Митягин С.Д., Спирин П.П. Природно-экономические основы градостроительства // Город и люди: пространство и время: Сборник статей Международной конференции, Смоленск, 28–30 апреля 2023 года. – Москва: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. С. 389–396.
7. Решение от 16 декабря 2022 года № 4-4 «О внесении изменений в решение Горно-Алтайского городского Совета депутатов от 3 сентября 2009 года № 18-1». 2022. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/298280> (дата обращения 12.02.2025).
8. Схема территориального планирования муниципального образования «Майминский район» Республики Алтай. Решение 38-й очередной сессии 4-го созыва «О внесении изменений в схему территориального планирования муниципального образования «Майминский район» Республики Алтай». 2021. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/lk/#/document-show/284163> (дата обращения 12.02.2025).
9. Митягин С.Д., Спирин П.П., Гаевская З.А. Градостроительные средства устойчивого развития // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 1. С. 113–120.
10. Шитов А.В., Семенов Ю.М. Ландшафтное планирование для целей природопользования на горных территориях (на примере Майминского района Республики Алтай) // InterCarto InterGIS. 2015. № 1(21) С. 194–203. DOI: 10.24057/2414-9179-2015-1-21-194-203.
11. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка концепции пространственного развития (мастер-плана) Горно-Алтайской агломерации, как основного ядра устойчивого развития Республики Алтай» // № госрегистрации 123070500013. НИИ ПГ Санкт-Петербург. 2023. 357 с.
12. Проект «Внедрение экологических принципов в территориальное планирование России (ЭкоРус)» Комплекс 2/7 – Рекомендация № 2: Усиление учета экологических аспектов в процессе территориального планирования Российской Федерации // Дрезден, Санкт-Петербург. 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/ekorus_2.hr_planungsverfahren_ru.pdf (дата обращения 12.02.2025).
13. Киреев С.М. Майминский археологический комплекс: тридцать лет исследований и наблюдений в кн: Проблемы изучения древней культуры Алтая. Горно-Алтайск, 1988. 275 с.
14. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2024 г. № 2501-р «О Стратегии государственной культурной политики на период до 2030 г». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/410284259/> (дата обращения 18.02.2025).
15. Митягин С.Д. Особенности современной проектной градостроительной деятельности в России // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 54–62. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-54-62.
16. Майборода В.А., Митягин С.Д., Спирин П.П. Правовые основы устойчивого развития (градостроительство). Санкт-Петербург: Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства, 2024. 236 с.

Информация об авторах

Спирин Павел Павлович, кандидат географических наук, академик РААСН, директор ООО «НИИ ПГ». E-mail: pavelsp@list.ru. Научно-Исследовательский Институт Перспективного Градостроительства. Россия, 191186, Санкт-Петербург, ул. Итальянская, 4; Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Россия, 119331, Москва, просп. Вернадского, 29.

Поступила 27.02.2025 г.

© Спирин П.П., 2025

***Spirin P.P.**

Scientific Research Institute Perspective Urban Planning

Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of Russia

**E-mail: pavelsp@list.ru*

URBAN DEVELOPMENT OF TERRITORIES WITH HIGH ENVIRONMENTAL RESPONSIBILITY (USING THE EXAMPLE OF THE ALTAI REPUBLIC)

Abstract. *Choosing the optimal model for urban development of any territory is a prerequisite for building an effective environmental management system. Urban development of pristine areas of nature untouched by economic activity imposes a special responsibility in the preparation of design solutions at any level of urban planning documentation. In this article, using the example of the Altai Republic, a region of high environmental responsibility, the methods of eco-oriented territorial planning and urban planning design are substantiated in order to build an optimal model of the planning framework and achieve sustainable development of the territory. The subject of testing of these methods is the territory of the Gorno-Altai agglomeration, the multi-vector development of which makes it possible to establish the cause-and-effect patterns of existing urban planning problems and find effective design solutions. The author, taking into account the urban-ecological potential of the territory and the demographic capacity of natural landscapes, identifies the preferred long-term directions of urban development of the agglomeration as the main core of the sustainable (noospheric) development of the Altai Republic. The framework models of territory development are proposed as the main form of spatial organization of the Gorno-Altai agglomeration: the basic framework of settlement, natural and ecological, transport, historical and cultural frameworks. Based on the conducted research, a mechanism has been developed for the functional and planning organization of the territory of an urban district and a municipal district as a single agglomeration system. A generalized functional zoning is proposed as a tool for regulating the territorial development of the Gorno-Altai agglomeration, aimed at creating urban planning conditions for balanced economic and ecological development of the territory, improving the quality of life of the population and preserving the unique socio-natural environment of Altai.*

Keywords: *environmental-oriented planning, Gorno-Altai agglomeration, sustainable develop*

REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation dated January 26, 2023 No. 129-r Moscow «On Approval of the Strategy of Socio-economic development of the Siberian Federal District until 2035» [Rasporyazheniye pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 26 yanvarya 2023 g. № 129-r Moskva «Ob utverzhdenii strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya sibirskogo federal'nogo okruga do 2035 goda»]. URL: <https://www.garant.ru.products.ipo.prime.doc.406164313> (date of access: 12.02.2025) (rus)

2. Resolution of the Government of the Altai Republic dated 03/13/2018 No. 60 (as amended on 03.29.2022) «On the Strategy of socio-economic development of the Altai Republic for the period up to 2035» [Postanovleniye Pravitel'stva Respubliki Altai ot 13.03.2018 N 60 (red. ot 29.03.2022) «O

Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Altai na period do 2035 g.»]. URL: <https://base.garant.ru.44360570> (date of access 12.02.2025) (rus)

3. Urban Planning Code of the Russian Federation of 29.12.2004 No. 190-FZ (as amended on 26.12.2024) (with amendments and additions, intro. effective from 01.01.2025) [Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 29.12.2004 № 190-FZ (red. ot 26.12.2024) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.01.2025)]. URL: https://www.consultant.ru.document.cons_doc_LAW_51040.13379792896b38e59ec4b5832f1b7ce8338a1d00 (date of access 12.02.2025) (rus)

4. Mityagin S.D. Methodological foundations of urban development policy and basic provisions of the State Strategy for Spatial Organization of the Russian Federation [Metodologicheskie osnovy gradostroitel'noj politiki i bazovye polozheniya

Gosudarstvennoj strategii prostranstvennoj organizacii Rossijskoj Federacii]. *Zodchij 21 vek*. 2012. No. 1. Pp. 8–13. (rus)

5. Skryabin P.V. Problems and directions of urban development of the recreational environment of the Altai Mountains [Problematika i napravlenie gradostroitel'nogo razvitiya rekreacionnoj sredy Gornogo Altaya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 1. Pp. 95–102. (rus)

6. Mityagin S.D., Spirin P.P. Natural and economic foundations of urban development [Prirodno-ekonomicheskie osnovy gradostroitel'stva]. *Gorod i lyudi: prostranstvo i vremya: Sbornik statej Mezhdunarodnoj konferencii, Smolensk, 28–30 aprelya 2023 goda*. Moskva: Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V. Lomonosova, 2023. Pp. 389–396. (rus)

7. Decision of December 16, 2022 № 4-4 «On Amending the Decision of the Gorno-Altai City Council of Deputies of September 3, 2009 № 18-1». 2022 [Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Altaj ot 13.03.2018 No 60 (red. ot 29.03.2022) «O Strategii social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Altaj na period do 2035 g.»]. URL: <https://base.garant.ru/44360570> (date obrashcheniya 12.02.2025) (rus)

8. Territorial planning scheme of the municipality «Maiminsky District» of the Altai Republic. Decision of the 38th regular session of the 4th convocation «On amendments to the territorial planning scheme of the municipality «Maiminsky District» of the Altai Republic». 2021. [Skhema territorial'nogo planirovaniya municipal'nogo obrazovaniya «Majminskij rajon» Respubliki Altaj. Reshenie 38-j ocherednoj sessii 4-go sozyva «O vnesenii izmenenij v skhemu territorial'nogo planirovaniya municipal'nogo obrazovaniya «Majminskij rajon» Respubliki Altaj». 2021]. URL: <https://gistp.economy.gov.ru/lk/document-show.284163> (date of access: 12.02.2025) (rus)

9. Mityagin S.D., Spirin P.P., Gaevskaya Z.A. Urban planning tools for sustainable development [Gradostroitel'nye sredstva ustojchivogo razvitiya]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2024. No. 1. Pp. 113–120. (rus)

10. Shitov A.V., Semenov Yu.M. Landscape planning for nature management purposes in mountainous areas (using the example of the Maiminsky district of the Altai Republic) [Landshaftnoe planirovanie dlya celej prirodopol'zovaniya na gornyh territoriyah (na primere Majminskogo rajona Respubliki Altaj)]. *InterCarto InterGIS*. 2015. No. 1(21) Pp. 194–203.

DOI: 10.24057.2414-9179-2015-1-21-194-203. (rus)

11. Report on the research work "Development of the concept of spatial development (master plan) of the Gorno-Altai agglomeration, as the main core of sustainable development of the Altai Republic" [Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Razrabotka koncepcii prostranstvennogo razvitiya (master-plana) Gorno-Altajskoj aglomeracii, kak osnovnogo yadra ustojchivogo razvitiya Respubliki Altaj»]. No gosregistracii 123070500013. NII PG Sankt-Peterburg. 2023. 357 p. (rus)

12. Project «Implementation of environmental principles in territorial planning of Russia (EcoRus)» Complex 2/7 - Recommendation № 2: Strengthening the consideration of environmental aspects in the process of territorial planning of the Russian Federation [Proekt «Vnedrenie ekologicheskikh principov v territorial'noe planirovanie Rossii (EkoRus)» Kompleks 2.7 – Rekomendaciya No 2: Usilenie ucheta ekologicheskikh aspektov v processe territorial'nogo planirovaniya Rossijskoj Federacii]. *Dresden, Sankt-Petrburg*. 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/ekoruss_2_hr_planungsverfahren_ru.pdf (date of access: 12.02.2025) (rus)

13. Kireev S.M. Maiminsky archaeological complex: thirty years of research and observations in the book: Problems of studying the ancient culture of Altai [Majminskij arheologicheskij kompleks: tridcat' let issledovanij i nablyudenij v kn: Problemy izucheniya drevnej kul'tury Altaya]. *Gorno-Altajsk*, 1988. 275 p. (rus)

14. Order of the Government of the Russian Federation of September 11, 2024 No. 2501-r "On the Strategy of State Cultural Policy for the Period up to 2030" [Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 11 sentyabrya 2024 g. No 2501-r «O Strategii gosudarstvennoj kul'turnoj politiki na period do 2030 g.»]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo.prime.doc.410284259> (date of access: 18.02.2025) (rus)

15. Mityagin S.D. Features of modern urban development activities in Russia [Osobennosti sovremennoj proektnoj gradostroitel'noj deyatel'nosti v Rossii]. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2021. No. 3. Pp. 54–62. DOI 10.22337.2077-9038-2021-3-54-62. (rus)

16. Majboroda V.A., Mityagin S.D., Spirin P.P. Legal basis for sustainable development (urban planning) [Pravovye osnovy ustojchivogo razvitiya (gradostroitel'stvo)]. *Sankt-Peterburg: Nauchno-Issledovatel'skij Institut Perspektivnogo Gradostroitel'stva*, 2024. 236 p. (rus)

Spirin, Pavel P. Candidate of Sciences in Geography, Academician of RAACS, director NII PG. E-mail: pavelsp@list.ru. Russia., 191186, St. Petersburg, Italienskaya St., 4; The Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of Russia. 29 Vernadskogo avenue, Moscow, 119331, Russia.

Received 27.02.2025

Для цитирования:

Спирин П.П. Градостроительное развитие территорий высокой экологической ответственности (на примере Республики Алтай) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 30–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-30-44

For citation:

Spirin P.P. Urban development of territories with high environmental responsibility (using the example of the Altai Republic). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 30–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-30-44

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-45-59

Перькова М.В., Грачева А.А., *Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
*E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru

ВЛИЯНИЕ ГРАДООБРАЗУЮЩЕЙ БАЗЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ Г. УЛЬЯНОВСКА

Аннотация. Город Ульяновск развивался на протяжении длительного времени как крупный транспортный и промышленный центр. В исследовании представлен ретроспективный анализ формирования промышленных территорий, а также влияние градообразующей базы на пространственное развитие города. С течением времени, с развитием торговли и технологий, промышленные комплексы Ульяновска стали одними из ключевых факторов градостроительного и экономического роста региона. Исследование опирается на анализ исторической эволюции промышленной застройки города Ульяновска, сложившихся «серых зон» и их влияния на архитектурно-градостроительную структуру города. В исследовании были проанализированы архивные и картографические материалы, проведен ретроспективный и картографический анализ. Анализ архивных и картографических материалов позволил выделить шесть основных этапов пространственного развития территории г. Ульяновска в зависимости от динамики развития градообразующей базы. В результате ретроспективного анализа и периодизации выявлены предприятия, которые оказали наибольшее влияние на пространственное развитие территории города. Предложены перспективные направления реновации промышленных территорий и комплексов: сохранение производства с модернизацией и технологических процессов, частичная рефункционализация с включением новых функций и адаптацией под современное использование, полная рефункционализация территорий.

Ключевые слова: город, промышленные территории, планировочная структура, ретроспективный анализ, пространственное развитие

Введение. Город Ульяновск имеет многовековую историю, уходящую корнями в основание Симбирска как города-крепости и крупного транспортного узла в 1648 году, промышленное мануфактурное производство занимало важное место в жизни города. С течением времени, с развитием торговли и технологий, промышленные комплексы Ульяновска стали одними из ключевых факторов градостроительного и экономического роста региона.

Город Ульяновск – это крупнейший город Среднего Поволжья, областной центр Ульяновской области с площадью городского округа около 616 кв. км. и населением 657 тыс. человек. Река Волга разбивает территорию города на две неравные части, более крупную – правобережье (Предволжье) и меньшую – левобережную (Заволжье) [1].

Нахождение на одной из крупнейших рек в России – Волге, дает Ульяновску выгодное транспортно-географическое положение. Город имеет разветвленную сеть железнодорожных, автомобильных и воздушных путей, возможность водного сообщения по Волжскому бассейну. В связи с этим открыт доступ к Азовскому, Каспийскому, Балтийскому, Черному и Белому морям. Это исторически определяло экономическое, промышленное и градостроительное развитие города. Сегодня Ульяновск выступает ключевым индустриальным узлом с диверсифицированным производственным комплексом. В его состав

входит около 300 крупных и средних предприятий регионального и федерального уровня, на которых трудятся более 150 тысяч человек. Ключевые позиции в промышленной структуре города занимают машиностроение, металлообработка и легкая промышленность [2, 3].

Проблема деградации промышленных территорий города возникла в XX в., когда в результате индустриализации активно начали строиться различные производства, что послужило важным фактором развития городов в экономическом и социальном плане [4]. Изначально промышленные центры находились на окраине города, но, по мере пространственного развития зоны жилой застройки плотно подошли к промышленным, создав новую градостроительную ситуацию [5]. Предприятия, окруженные жилой застройкой, вынуждены были прекратить свою работу, другие закрылись из-за изменения технологических процессов, неактуальности конкретных производств и других экономических факторов. Производственные территории пришли в упадок и образовали деградирующую «серую зону» в плотной застройке городов, которая порождает ряд проблем. Стагнирующие производственные территории требуют переосмысления и реновации [6]. В этой связи актуальным представляется комплексное изучение промышленных территорий г. Ульяновска, выявление архитектурной идентичности, социального и культурного потенциала промышленных объектов.

Целью настоящего исследования является анализ влияния развития промышленных территорий на развитие градостроительной структуры города Ульяновска. Объектом исследования являются промышленные территории и объекты города Ульяновска. Задачи исследования включают: 1) ретроспективный анализ формирования промышленных территорий города и их влияния на градостроительную структуру г. Ульяновск; 2) анализ современных проблем промышленных территорий города; 3) выделение перспективных направлений реновации промышленных объектов Ульяновска.

Материалы и методы исследования базируются на комплексном изучении промышленных территорий города Ульяновска, их градостроительного влияния, экономических, исторических, экологических факторов и социокультурных приоритетов. Исследование опирается на анализ исторической эволюции промышленной застройки города Ульяновска, сложившихся «серых зон» и их влияния на архитектурно-градостроительную структуру города. В исследовании были проанализированы архивные и картографические материалы, проведен ретроспективный и картографический анализ. Основополагающими материалами в области промышленной застройки являются материалы Международного комитета по сохранению индустриального наследия (TICCIH), Нарский документ 1994 г. (ICOMOS), Практическое руководство по выполнению Конвенции об охране всемирного наследия 2008 г. (UNESCO).

Закономерности формирования и развития промышленной архитектуры освещали в своих трудах М.С. Штиглиц, А.Я. Ковалев, В.А. Новиков, Г.Н. Черкасов, Л.П. Холодова, Н.С. Алферова, Т.П. Кудрявцева, Д. Д. Попова, Ю.П. Бочарова, С.В. Демидов, В.В. Запарий. Проблемам сохранения и реновации объектов индустриального наследия посвящены научные работы М.А. Гранстрем, А.В. Снитко, Д.С. Чайко, А.А. Чадовича, А.А. Яковлева, Н.Н. Сеницына, Л.О. Титовой.

Исторические, природные, культурные, градостроительные и архитектурные особенности г. Ульяновска отражены в работах А.М. Капитанова, В.А. Самогорова, В.Л. Пастушенко, О.А. Свешниковой, С.С. Касаткиной, И.Г. Котовой, А.В. Прохоровой. Однако, вопросы касающиеся изучения влияния промышленных территорий на планировочную структуру города и их современного состояния рассмотрены не в полной мере.

Основная часть. Для выявления роли формирования промышленных территорий в пространственном развитии города Ульяновска был проведен ретроспективный анализ пространственного развития города и выделены основные

этапы исторического развития промышленных территорий.

Первый этап (с момента основания крепости Синбирск до 1898 г.). Ульяновск (на тот момент Синбирск), первоначально основан в 1648 г. по указу царя Алексея Михайловича как крепость Синбирск для охраны восточных рубежей Российского государства, с самого момента своего возникновения начал формировать промышленную специализацию, опираясь на богатые природные ресурсы Поволжья. До середины XVII в. город сохранял название Синбирск, происходящее от имени булгарского князя Синбира, основавшего городок Синбирск на Волге чуть ниже современного Ульяновска, в 1780 г. был переименован в Симбирск, в 1924 году город Симбирск изменил свое название на Ульяновск в связи со смертью В.И. Ленина, который родился в городе.

Однако история территорий города Ульяновска начинается задолго до основания крепости. В домонгольский период на территории среднего Поволжья основалась Волжская Булгария, потомок Великой Булгарии в XII веке. Производственная структура государства имела комплексный характер, где преобладающую позицию занимало сельское хозяйство, однако ремесленная отрасль играла немаловажную роль и была искусно развита. Здесь развивалось разнообразное промышленное производство – от чугунолитейного дела и монетного чекана до кожевенного ремесла и ювелирного искусства. Изделия булгар пользовались высоким спросом и экспортировались по Волге. Однако после завоевания территории ханом Батыем, процветающее поселение было разрушено и пришло в упадок, что привело к потере важного экономического центра на Волге.

В XVII в. активное развитие торговых маршрутов по Волге внутри Российского государства стало мощным катализатором для роста города-крепости Синбирск. Он трансформировался в экономический и торговый центр, где наряду с сельским хозяйством интенсивно развивались мануфактурные производства. На территории Синбирского края функционировали кожевенные и суконные фабрики, водяные мельницы, винокуренные предприятия, соляные варницы. Промышленность региона развивалась за счет использования местного сырья и была ориентирована на экспортные поставки по всей стране. В 1780 г/ была основана Симбирская губерния из частей Казанской и Нижегородской губерний, и население ее насчитывало 760 тысяч душ, но город Симбирск все еще оставался провинциальным.

Земледелие и крестьянские промыслы являлись базой для развития и крупного мануфактурного производства. К середине XVIII в. в Симбирской губернии функционировало разнообразное промышленное производство, включая 18 винокуренных заводов, 2 шерстомойки, 6 кожевенных и 2 стекольных заводов, 21 салотопку, 2 мыловаренных предприятия, 7 суконных и полотняных мануфактур, 6 лесопилок, 3 поташных заводов, а также красочный, серный, селитренный заводы и соляные варницы. Общая численность рабочих на 16 крупных предприятиях составляла 3697 человек, в среднем 231 рабочий на завод. К 1861 году суконная промышленность Симбирской губернии [7], ставшая ведущей отраслью, производила продукции на 52 % всей промышленности региона, занимая 13 тысяч человек, что составляло 66 % всех промышленных рабочих. Крупнейшими производителями сукна были суконная мануфактура княгини Н. Голицыной и Ишеевская суконная фабрика, где в 1869 г. работало 470 человек [8]. Мануфактуры как форма дворянского промышленного предпринимательства были важнейшими градообразующими факторами. Помещики строили мануфактуры в своих уездах, формируя вокруг них крепостные поселения, которые разрастались в деревни.

Однако после отмены крепостного права, развитие промышленности Симбирска замедлилось. До реформы 1861 г. Симбирская губерния носила типичный сельскохозяйственный характер с дворянско-помещичьим землевладением. Помещикам здесь принадлежало свыше миллиона десятин земли, а помещичьи крестьяне составляли 38,8% от всего населения. Феодальные мануфактуры достигли своего кризисного состояния и многие из них были упразднены. Промышленность изменила свою технико-экономическую структуру из вотчинной в капиталистическую, это означало переход мануфактур в фабрики. Это также и означало изменение пространственной структуры города. Большинство вотчинных мануфактур могли функционировать изолированно от городских связей, в пределах вотчины, где находится феодал и крестьянское население, задействованное в работе предприятия. Капиталистические же фабрики имели необходимость расположения в системе городских связей, так как зависели от привлечения рабочей силы, пространственная доступность была важна. Таким способом все большую роль играли фабрики находившиеся в структуре города или развитого населенного пункта с транспортной инфраструктурой. За период с 1754 по 1858 годы в Симбирской губернии было открыто 61 вотчинная суконная мануфактура, но к 1861 году их число сократилось до 31, так как остальные были

закрыты их владельцами. Таким образом, из двух вотчинных мануфактур в среднем сохранялась лишь одна. В попытках улучшить производственные темпы вводились количественные и качественные изменения. Увеличивалось количество производственных станков, появлялись паровые машины и инновационное оборудование, все это требовало новых площадей, таким образом промышленные территории разрастались, что стало предпосылкой пространственного доминирования в структуре города.

Несмотря на спад темпов производства, Симбирская губерния по-прежнему являлась важным производственным узлом. К концу XIX столетия в самом Симбирске насчитывалось множество ремесленных производств различной направленности, в их числе металлообработка, суконные и столярные производства. Большинство из них представляли собой небольшие предприятия. Наибольшую долю продукции губернии представляли сукно, кожа, спирт, зерно, которые транспортировались по реке Волге. Речное сообщение носило сезонный характер. Отсутствие круглогодичных транспортных путей осложняло приток инвестиций в хозяйство города [9].

Переломным событием стало строительство Московско-Казанской железнодорожной ветки, которая соединила Симбирск и Инзу с центральными регионами страны. Железнодорожное направление Инза – Симбирск проходило близ слободы Туть, название которой связано с историей тутового сада, заложенного в XVII в. по приказу царя Алексея Михайловича. Первоначально на данной территории планировалось разведение шелкопрядов, однако сад просуществовал недолго ввиду неподходящих климатических условий. В начале XIX столетия на территории бывшего тутового насаждения начали выделять земельные наделы для отставных военнослужащих, так сформировалась одноименная городская слобода. В 1897 году в этом районе было развернуто строительство железнодорожной станции Симбирск-1, а 4 июня того же года заложен каменный вокзальный комплекс, включающий производственные мастерские и товарные склады. Сохранились почтовые открытки, с изображением первого вокзала Симбирска. Это кирпичное одноэтажное здание, построенное по типовому проекту. На фасаде здания отчетливо виден узор из кирпичной кладки. В городе возникли три товарные станции. Железная дорога стала важным транспортным средством для доставки в Симбирск различных товаров из других губерний, таких как промышленные товары, соль, нефтепродукты (мазут, керосин) и каменный уголь.

Второй этап (1898–1941 гг.). В период с 1900 по 1916 год темпы развития промышленности в Симбирске были достаточно слабыми по многим причинам. Отсутствие полезных ископаемых на территории края, превалирование мелких производств и отсутствие сильного централизованного фабрично-заводского сектора Беседа Доля промышленной продукции в валовой продукции народного хозяйства Симбирска составляла менее 21 % [10]. Промышленность города была представлена в основном легкой и пищевой отраслями, при практическом отсутствии машиностроения, металлургии и топливной промышленности.

Неразвитая железнодорожная инфраструктура делала Симбирск тупиковой станцией. Для преодоления этой проблемы был проложен подъездной путь на левом берегу Волги, впоследствии продленный до Бугульмы, а в 1914 году завершено строительство Волго-Бугульминской магистрали, связавшей город с Уралом и Сибирью. В 1916 году введен в эксплуатацию железнодорожный мост через Волгу, соединивший Московско-Казанскую и Волго-Бугульминскую линии, превратив Симбирск в ключевой транспортный узел.

Начало Первой мировой войны стало мощным толчком для развития местной промышленности. В этот период были запущены новые текстильные и суконные фабрики, деревообрабатывающие, металлообрабатывающие, кирпичные и мукомольные заводы. На заволжских территориях был построен крупный патронный завод, оказавший значительное влияние на градостроительное развитие города. К 1920-м годам численность симбирского населения достигла 70 тысяч человек, что обострило жилищную проблему и привело к уплотнению жилой застройки [1]. Гражданская война, смена власти и государственного строя в 1917–1922 годах изменили курс развития города и его промышленности. Новый политический склад требовал усиленных темпов производства и наращивания экономики. В губернии были проведены масштабные ремонтно-восстановительные и строительные работы на производственных площадях, ремонт разрушенного жилого фонда. В период с 1926 по 1927 годы было восстановлено 17 домов общей жилой площадью около 12 тысяч квадратных метров, а также проведен коммунальный ремонт в 193 домах. Новое жилье, как правило, строилось индивидуальными застройщиками.

Вследствие частых оползней на территориях вблизи реки Симбирки, Свияги, а также на крупном волжском берегу в начале 1920-х годов, потребовалось пересмотреть стратегию градостроительного развития. Было принято решение осваивать новые земельные участки, находящиеся за

Свиягой и на заволжских пространствах. Согласно утвержденному в 1925 г. плану, предусматривалось расширение городских границ в северном и южном направлениях путем организации регулярной квартальной застройки.

В 1939 г. разработан проект планировки Ульяновска, нацеленный на гармоничное включение новых развивающихся районов в сложившуюся городскую ткань. Благодаря наличию свободных территорий, стратегия развития правобережной части города сфокусирована на расширении в направлениях запада и севера. Было принято решение о размещении железнодорожного узла в районе станции Киндяковка, что создавало определенные сложности в обеспечении связи между городом и осваиваемым южным промышленным районом. Освоение южной части города заводом имени Володарского потребовало поиска новых территорий для жилищного строительства, поскольку земли в районе Винновской рощи были уже задействованы. В результате было принято решение о застройке обширной площадки на западе от города, за рекой Свиягой, под жилье и промышленные объекты.

Проект планировки 1939 г. предусматривал развитие Ульяновска в южном, западном и северном направлениях от исторического центра, формируя полукольцевую конфигурацию. Уличная сеть основных транспортных артерий определена с опорой на существующую застройку и радиальные магистрали, подходящие к набережной Волги - Венцу, такие как Казанский, Московский и Сызранский тракты. Однако данный проект не был реализован в связи с начавшейся Второй мировой войной, но послужил базой для генерального плана 1943 года.

Третий этап (1941–1976 гг.). Важным событием в развитии промышленности Ульяновска стало строительство трех крупных заводов: Наркомата авиационной промышленности, завода крупнотокарных станков Наркомата тяжелого машиностроения и завода "Электрораппарат" Наркомата электротехнической промышленности (рис 1).

Во время Великой Отечественной войны в Ульяновск были эвакуированы 15 предприятий и 25 правительственных, научных учреждений, включая институт автоматики и телемеханики, проектно-конструкторское бюро Наркомата путей сообщения, проектные институты авиационной промышленности. Крупнейшим эвакуированным объектом стал автомобильный завод им. Сталина (ЗИС) из Москвы. Для организации производства грузовиков на тяжелом топливе было решено построить Ульяновский автомобильный завод, для которого выделили территорию в За-

свияжье, где начали возводить ТЭЦ, корпуса завода и жилой микрорайон. Кроме того, в городе разместились некоторые цеха эвакуированного Харьковского электромеханического завода, на базе которых был основан завод "Контактор". Прибывшие предприятия оперативно размещали на новых производственных площадках и значительно увеличивали производства объемы по сравнению с довоенным периодом. К 1944 году в Ульяновской области функционировало 4513 предприятий, в том числе 578 крупных и мелких промышленных. Объемы производства выросли в 3,5 раза по сравнению с довоенным периодом [7]. Одним из крупнейших промышленных предприятий в годы войны являлся патронный завод им. Володарского, будучи ведущим производителем патронов в стране. В 1938 году по ул. Л. Толстого построены три кирпичных пятиэтажных многоквартирных жилых дома в конструктивистском стиле для работников завода, известные как «володарские». Необходимость ежедневного транспортирования людей на работу стимулировала развитие городского транспорта. Так появился "трудовой" поезд, который перевозил работников Володарки через реку Волгу по железнодорожному мосту. Впоследствии этот поезд получил название "патронник". Однако зимой многие жители правобережной части города предпочитали ходить на работу через Волгу по льду. Промышленный рост вызвал стремительное увеличение количества населения Ульяновска, что привело к активной застройке левобережной части города. Здесь были возведены обширные жилые кварталы для работников заводов и железнодорожников. Развитие градообразующей базы традиционно повлекло за собой развитие жилой зоны и объектов социальной инфраструктуры.

В 1940 году в Ульяновске в Засвияжском районе города началось строительство комплекса заводов Наркомата авиационной промышленности в связи с развитием оборонной промышленности. По указанию Наркомата был разработан проект планировки Засвияжского района с застройкой шести первоочередных кварталов и рабочие проекты для строительства жилых домов, часть которых была реализована.

Согласно генеральному плану 1945-го года развитие города предполагалось вести в южном, западном и частично северном направлениях. Устанавливалась новая транспортная связь между Засвияжским районом и центром города по новой магистрали (в настоящее время Московское шоссе), которая соединяла строящийся автозавод и рабочий поселок с улицей Горького (улица Минаева). Генеральным планом опреде-

лялся рост населения города до 350 тысяч человек. Изменилась индустриальная направленность города. В результате развития промышленности Ульяновск стал центром точного и среднего машиностроения, при этом легкая и пищевая промышленность были представлены в ограниченном виде, лишь для обеспечения потребностей региона. Предприятия с вредными производствами, такие как мясокомбинат, спиртзавод и учебный аэродром, были вынесены за пределы жилой застройки города [11]. В период войны на территории Ульяновской области была построена железнодорожная магистраль между Казанью и Сталинградом протяженностью 137 км, имевшая важное военно-стратегическое значение, обеспечивая транспортную связь Ульяновска с южными районами области и другими крупными городами Поволжья. За счет размещения эвакуированных предприятий, новых заводов и инфраструктуры численность населения города значительно возросла, достигнув 150 тысяч человек к окончанию войны. Для обслуживания этого населения построено 15 образовательных учреждений на 1800 мест, детские сады на 210 мест, а также учреждения культуры вместимостью 2375 мест [9]. Началась реконструкция старых больниц и строительство новых медицинских корпусов. Таким образом в военные годы основным градообразующим фактором стали эвакуация промышленности и строительство новых предприятий, пространственная структура города значительно изменилась: появились новые жилые массивы на левом берегу Волги, в южных и западных направлениях, активно развивался новый район - Засвияжье.

В послевоенный период промышленный рост и урбанизация Ульяновска продолжились, при этом произошло смещение акцента с оборонной на гражданскую промышленность. В городе были построены и введены в эксплуатацию различные предприятия - завод железобетонных изделий, комбинат строительных материалов, завод тяжелых станков, хлебозавод, молочный завод.

Значительно ускорились темпы жилищного строительства и коммунального развития. К началу 1950-х годов государственный жилищный фонд в городах и поселках области достиг 854 тыс. кв. м, а к началу 1960-х превысил 3 млн. кв. м, половина из которых приходилась на общественный сектор. Улучшалось благоустройство - проведены водопровод и электроснабжение от ТЭЦ автозавода. В 1950-х годах в стране началось масштабное жилищное строительство, ориентированное на предоставление квартиры каж-

дой семье. Для массового жилищного строительства в Ульяновске был создан завод крупнопанельного домостроения.

Строительство Волжской ГЭС и образование Куйбышевского водохранилища в 1956 г. привело к затоплению значительных территорий, включая исторический район "подгорье" в правобережной части города. Перед этим часть индивидуальных жилых домов была перенесена на северную окраину, что стало основой для формирования новых жилых районов вдоль проспекта Нариманова. Кроме того, в северной, Засвияжской и железнодорожных частях города были застроены большие микрорайоны индивидуальными жилыми домами усадебного типа. Между южной частью города и Киндяковской рощей (в настоящее время парк Винновская роща) строится завод малолитражных двигателей. К началу 1960-х годов в Ульяновске насчитывалось около 60 промышленных предприятий. В тот период также были реализованы важные проекты: строительство нового железнодорожного вокзала Ульяновск-1, обустройство речного порта и развертывание жилого комплекса на пересечении улиц Карла Маркса и Крымова - Гагарина [1].

1955–1962 годы в центре города в долине реки Симбирки был построен главный стадион в Ульяновске. Осуществлялось застройка жилыми домами улиц Автозаводская и района УЗТС в Засвияжье, который сформировался благодаря строительству Ульяновского завода тяжелых и уникальных станков. В 1946 году вышло Постановление «О развороте в стране тяжелого станкостроения» и в 1953 году началось строительство УЗТС.

Постановления Совета Министров СССР, принятые в 1964–1966 годах, сыграли значимую роль в градостроительном развитии промышленной базы г. Ульяновска. Были определены меры по развитию города до 1970 г. Началась реализация программы строительства, предусматривающая развитие заводов радиолампового производства, предприятий пищевой промышленности и новые мощности ТЭЦ, водопроводы и газопроводы. Также было начато строительство нового здания речного порта, аэропорта и железнодорожного вокзала. На улицах 12 Сентября и Минаева, в районе УЗТС и Засвияжье, были возведены многоквартирные дома и объекты культурно-бытового обслуживания, были созданы новые школы, детские сады, ясли, больницы, поликлиники, объекты коммунальной сферы и производственные здания. Однако в стремлении достичь высоких количественных показателей, качество многих строящихся объектов оставляло желать лучшего.

Однако, главной стройкой во второй половине 1960-х годов стало возведение Ленинского мемориального центра. Благодаря чему началась реконструкция центральной части города. Застройка старых городских районов была объявлена малоценной, кварталы с исторической застройкой укрупнялись до размеров микрорайонов. На месте ветхой деревянной застройки были возведены новые многоэтажные дома. Главным зданием мемориального ансамбля стал Ленинский мемориал, выполненный в стиле модернизм. Также мемориальная зона включала в себя памятные места и сооружения, новые здания: филиал Центрального музея В.И. Ленина, Дворец культуры, Дворец пионеров, педагогический институт, библиотеку, музыкально-художественное училище, школу № 1, Дом политического просвещения и другие. Мемориальная зона вытянута по продольной оси с севера на юг, параллельно бульвару Новый Венец и улице Советской (бывшей Спасской). На западе ее границей служит полукольцо улицы Гончарова. Восточная граница Мемориальной зоны представлена высоким волжским берегом. Масштабные градостроительные работы способствовали быстрому росту и укреплению строительного производства в экономике региона.

Четвертый этап (1976–1991 гг.). В 1976 г. началось строительство авиастроительного комплекса "Авиастар", ставшего ключевым промышленным комплексом современного Ульяновска, численность населения города увеличилась более чем на 200 тысяч человек. В этой связи развивалось многоэтажное строительство. Расширение жилых территорий города шло за счет освоения правобережных территорий, а также района Верхней террасы на левом берегу Волги. Именно вокруг авиационного комплекса в последующие десятилетия сформировался район верхней террасы - часть Заволжского района.

Строительство Авиационного комплекса стало комплексным проектом, включившим в себя в себя не только промышленные объекты и аэродром, но также жилые кварталы с полным набором социальной инфраструктуры. Жилые районы Нового города представлены в основном типовыми железобетонными многоэтажками. Был разработан новый генеральный план, способный вместить до 500 тысяч жителей. Он предусматривал обширную реконструкцию исторического центра города и развитие жилой застройки в западном, южном и северном направлениях. Сельские районы также претерпели преобразования и стали основой для будущей продовольственной базы комплекса. Была создана зона отдыха для рабочих авиастроительного завода. В процессе строительства использовались

передовые методы производства. Комплектно-блочный метод монтажа промышленных зданий позволял установить полностью смонтированные блоки покрытия с технологическим оборудованием и инженерными коммуникациями. В 1974 г. благодаря появлению «Авиастара» в центральной части города было запроектировано летное училище, старейшее в России учебное заведение по подготовке лётного состава для гражданской авиации. Был построен университетский городок, где учебные корпуса соседствуют с общежитиями для курсантов и преподавателей. Отдельные факультетские здания и общежития свободно расположены на обширной благоустроенной территории. В центре пространственной композиции училища запланирована многоуровневая общественная площадь и зеленый партер. При общем градостроительном решении архитектура отдельных корпусов выполнена по-разному, что придает комплексу стилистическое разнообразие и сложность.

В 1980-е годы в северной части города начинает строиться многоэтажное здание приборостроительного завода «Искра». В то время как осваивались технологические линии, предприятие продолжало развиваться - возводились новые корпуса, прокладывались инженерные сети и коммуникации, строились станция нейтрализации, линии электропередач, водородно-кислородная станция. Шел монтаж оборудования, персонал проходил обучение [12]. Архитектурный ансамбль завода «Искра» является отсылкой на здание Юнеско в Париже архитектора Марселя

Брейера. Главный корпус завода в форме трилистника формирует градостроительный ансамбль входной площади и начало проспекта Нариманова. Крыло здания, выходящее на проспект, длиннее боковых крыльев со стороны улицы Релина. Композиция фасадов сочетает крупные горизонтальные остекленные ленты и вертикальные солнцезащитные ребра, фасад облицован навесными панелями из закаленного стекла в алюминиевом обрамлении, создавая разнообразие фасадов и сложный, меняющийся облик.

Пятый этап (1991–2010 гг.). В конце 1980-х годов, когда основные работы по строительству Ульяновского авиационного промышленного комплекса были завершены, потребовалось техническое обновление и реконструкция ряда промышленных объектов. Совет Министров СССР принял резолюцию "О мерах по комплексному развитию г. Ульяновска и Ульяновской области в 1985–1990 гг. и на период до 1995 г.". В соответствии с этим была предусмотрена реконструкция промышленных предприятий, строительство крупнейшего в Европе перехода через Волгу, а также развитие социально значимых объектов. Началось строительство крупного научно-производственного центра по микроэлектронике (УЦМ) под руководством Минэлектронпрома СССР. Планировался снос ветхого жилья и возведение новой жилой застройки, расширение ТЭЦ-1, развитие транспортной инфраструктуры и рекреационных зон. Часть работ была начата в период с 1986 по 1990 годы, но прекращена из-за проблем с финансированием (рис. 1).



Рис. 1. Хронологическая лента построенных промышленных объектов г. Ульяновска. Разраб. Грачева А.А.

В 1990-е годы в связи с изменением государственного строя промышленность Ульяновска пережила тяжелый кризис, что привело к закрытию и сокращению производства на многих предприятиях. В период с 1986 по 1995 годы темпы производства снизились до 1,0 % в год. Положительная динамика наблюдалась с 2005 по 2010 год, когда среднегодовой прирост производства составлял 2,6 %, за исключением 2009 года, когда произошло снижение на 24,8 % к предыдущему году. Главной причиной этого спада стал мировой финансовый кризис, который охватил экономику

в 2009 году [13]. В связи с сокращением инвестиций в экономику в 1990-х годах, строительство многих объектов было заморожено, и объемы строительных работ значительно сократились. В конце 1990-х годов в регионе функционировало свыше 400 крупных и средних промышленных предприятий. Треть из них относилась к машиностроительной и металлообрабатывающей отраслям [14].

Усиление процесса структурной перестройки производства произошло из-за неравномерного роста цен на промышленную продукцию, снижения спроса в условиях ограничений

внутреннего рынка. Предприятия были вынуждены перепрофилироваться на выпуск совершенно новых видов продукции и адаптироваться к новым условиям. Резко изменилась структура производства [2]. Сократился удельный вес легкой промышленности в общем объеме производства. Темпы оборонной промышленности, которая раньше являлась одним из приоритетных направлений производства, шли на спад. Это связано с процессом конверсии, производимым на территориях бывших оборонных предприятий. Благодаря наличию производственного потенциала и высококвалифицированных кадров, было освоено производство гражданских самолетов, сложного медицинского оборудования, также бытовой техники повышенной сложности. В попытках преодолеть тенденции спада некоторые производства перепрофилировались и начали производить новые изделия, пользующиеся спросом, такие как столярные изделия, мебель, строительные материалы. Новые быстро развивающиеся промышленные отрасли в резко изменили структуру производства. Однако не все предприятия смогли адаптироваться к условиям изменяющегося рынка и закрылись, а их территории пришли в упадок. Благодаря всем принятым мерам по конверсии производства с 1998 года начался подъем промышленного производства, однако прежних масштабов он достигнуть смог только к 2010 году. Экономический кризис и стагнация в промышленной области не могли не оказать влияние на градостроительное развитие города.

Шестой этап (2010 г. – настоящее время).

В ноябре 2009 года был открыт второй мост через Волгу в Ульяновске, получивший официальное название "Президентский". В данный момент он находится на пятом месте по протяженности в России и является самым крупным речным мостом балочного типа. Президентский мост призван соединить левобережную и правобережную часть Ульяновской области и регионального центра. У левого берега высота опор начинается от 11 метров, а у правого берега достигает 60 метров. Необходимость в строительстве нового моста через Волгу в Ульяновске была вызвана возведением на левом берегу реки крупнейшего в СССР авиационного завода и жилого микрорайона для авиастроителей, рассчитанного на 250 тысяч жителей. К тому времени пропускная способность существующего железнодорожного моста была полностью исчерпана. Начало строительства нового моста в 1986 году совпало с происходившими в стране социально-экономическими преобразованиями. Экономические трудности 1990-х годов негативно отразились на финансировании проекта мостового перехода, из-за

чего завершение строительства отодвинулось на 14 лет.

Последовательность строительства объектов градообразующей базы отражены на рис.3. Цветовой насыщенностью показана предприятий по количеству рабочих мест, величине объекта и его значимости.

В 2009 г. Правительство РФ утвердило паспорт инвестиционного проекта "Создание первой очереди промышленной зоны "Заволжье", реализуемого с государственной поддержкой. В скорейшем времени американская компания "Марс" открыла там производство. В 2011 г. эта промзона стала третьим сертифицированным индустриальным парком России, к 2017 г. включила заводы ведущих мировых брендов, таких как "Бриджстоун", "Хемпель", "Шеффлер", "Таката", "Джокей Пластик", "Легран", "ДМГ Мори" и "Хестего" и др. Индустриальный парк "Заволжье" приобрел статус одной из наиболее успешных промышленных площадок РФ. В 2013 г. началось строительство инфраструктуры портовой экономической зоны "Ульяновск", первый резидент которой – компания "Т1" приступил к работе в 2016 г.

2010-е годы ознаменовались возрождением ульяновского авиационного предприятия "Авиастар-СП": в 2012 г. состоялся первый полет нового тяжелого транспортника Ил-76МД-90А, а контракт на его поставку Минобороны стал крупнейшим в истории отечественного авиастроения. Это событие дало импульс к развитию авиакластера и закреплению за Ульяновском статус "Авиационной столицы России", подтвержденного открытием новых профильных производств [14]. Пространственное развитие территории с учетом формирования градообразующей базы отражено на рис.2.

Третье десятилетие XXI в. началось с серьезных вызовов: пандемия, многократные локдауны, антироссийские экономические санкции. Ульяновск покинули многие иностранные компании, освободив производственные пространства. В сложившейся ситуации ключевыми отраслями Ульяновской области стали строительство и сельское хозяйство. По итогам 2020 г. регион занял 3-е место по социально-экономическим показателям. Вследствие санкций получило новый импульс развитие авиастроения, в регионе возобновились переговоры о размещении производства самолетов и беспилотников.

В 2022 г. Минпромторг РФ включил Ульяновскую область в число 5 регионов, где будут созданы промышленные технопарки по развитию микроэлектроники, что позволит удовлетворить спрос на микрочипы для ОПК и окажет поддержку местным инновационным компаниям в

коммерциализации научных разработок [14]. Однако, достаточно большое количество предприя-

тий остаются нефункционирующими и отрицательно влияют на качество городской среды города.

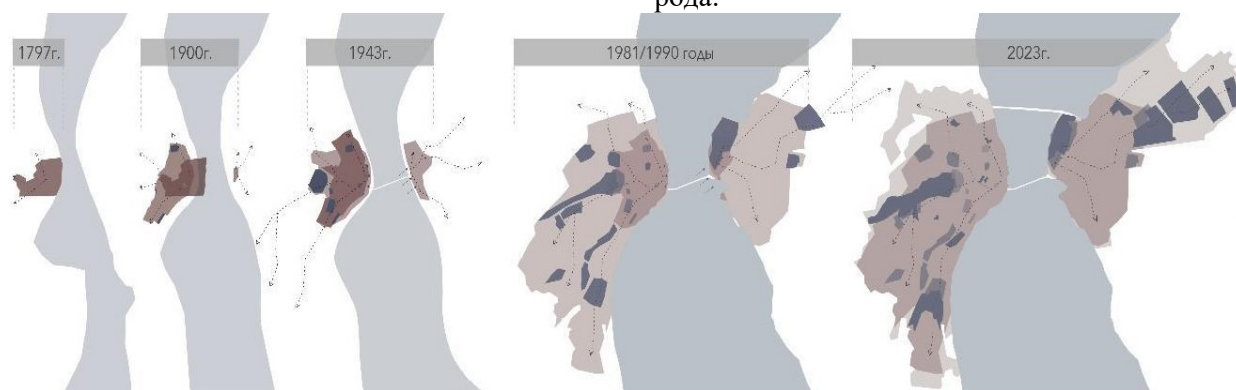


Рис. 2. Ретроспективный анализ пространственного развития г. Ульяновска с учетом формирования градообразующей базы. Разраб. Грачева А.А., Перькова М.В.

В результате ретроспективного анализа и периодизации выявлено, что наибольшее влияние на пространственное развитие территории оказали следующие крупные предприятия города.

1. *Ульяновский патронный завод (1916 год)*. Патронный завод имени Володарского был одним из крупнейших предприятий в годы Гражданской войны. Расположенный на левом берегу Волги, который ранее слабо освоен. Для тысяч работников патронного завода были построены первые в городе многоквартирные дома, и Заволжской рабочий поселок вокруг завода, который впоследствии трансформировался в новый городской район - Нижнюю террасу. Возводились новые жилые районы с социальной инфраструктурой.

2. *Железнодорожный вокзал Ульяновск-I (1942 год)*. В 1902 году от левого берега Волги начала строиться ветка на восток, вокруг которой постепенно сформировался район Киндяковка - бывшая деревня, со временем ставшая пристанционным поселком железнодорожников. Строительство железных дорог стало катализатором формирования Железнодорожного района Ульяновска, промышленного комплекса и крупной жилой зоны.

3. *Ульяновский автомобильный завод (1942 год)*. В 1941 году Московский автомобильный завод имени Сталина был эвакуирован в Ульяновск. Для размещения предприятия и сопутствующей жилой застройки выделили 200 гектаров земли за рекой Свиягой, на тот момент малоосвоенной территории. Завод был построен в кратчайшие сроки, положив начало формированию одного из крупнейших районов - Засвияжского. Были построены необходимые инфраструктурные объекты, котельные, электростанции, которые обеспечивали предприятие и жилую зону, которая была сформирована для работающих на заводе.

4. *Ульяновский моторный завод (1943 год)*. Моторостроительные цеха Московского автомобильного завода были размещены на южной окраине Ульяновска, рядом с железнодорожными путями. В 1943 году предприятие предоставило работникам ссуды на строительство домов рядом с заводом. В результате сформировался новый жилой микрорайон вдоль улицы Первомайской. К 1970-м годам здесь было возведено 50 домов с развитой социальной инфраструктурой.

5. *Ульяновский завод тяжелых и уникальных станков (1949 год)*. В 1946 году было принято решение о строительстве в Ульяновске станкостроительного завода. Строительство началось с создания жилой зоны для будущих работников предприятия, обеспечивая комфортные условия труда и быта для будущих тысяч станкостроителей. Вокруг завода вырос новый микрорайон УЗТС. Заводу было подчинено специализированное профтехучилище, два детских сада, две школы и пять совхозов. На первом этапе были возведены кварталы из двухэтажных домов, а на втором этапе в конце 1970-х годов построены три девятиэтажных жилых дома.

6. *АВИАСТАР (1976 год)*. В 1975 году в Ульяновске началось строительство крупного авиационного промышленного комплекса. Параллельно с заводом на левом берегу Волги возводился жилой массив, давший начало формированию крупного микрорайона города "Новый город" для размещения работников предприятия. Были возведены новые объекты транспортной, энергетической, научной и социальной инфраструктуры. В город была перенесена Школа высшей лётной подготовки - одно из лучших профильных вузов страны (рис. 4).

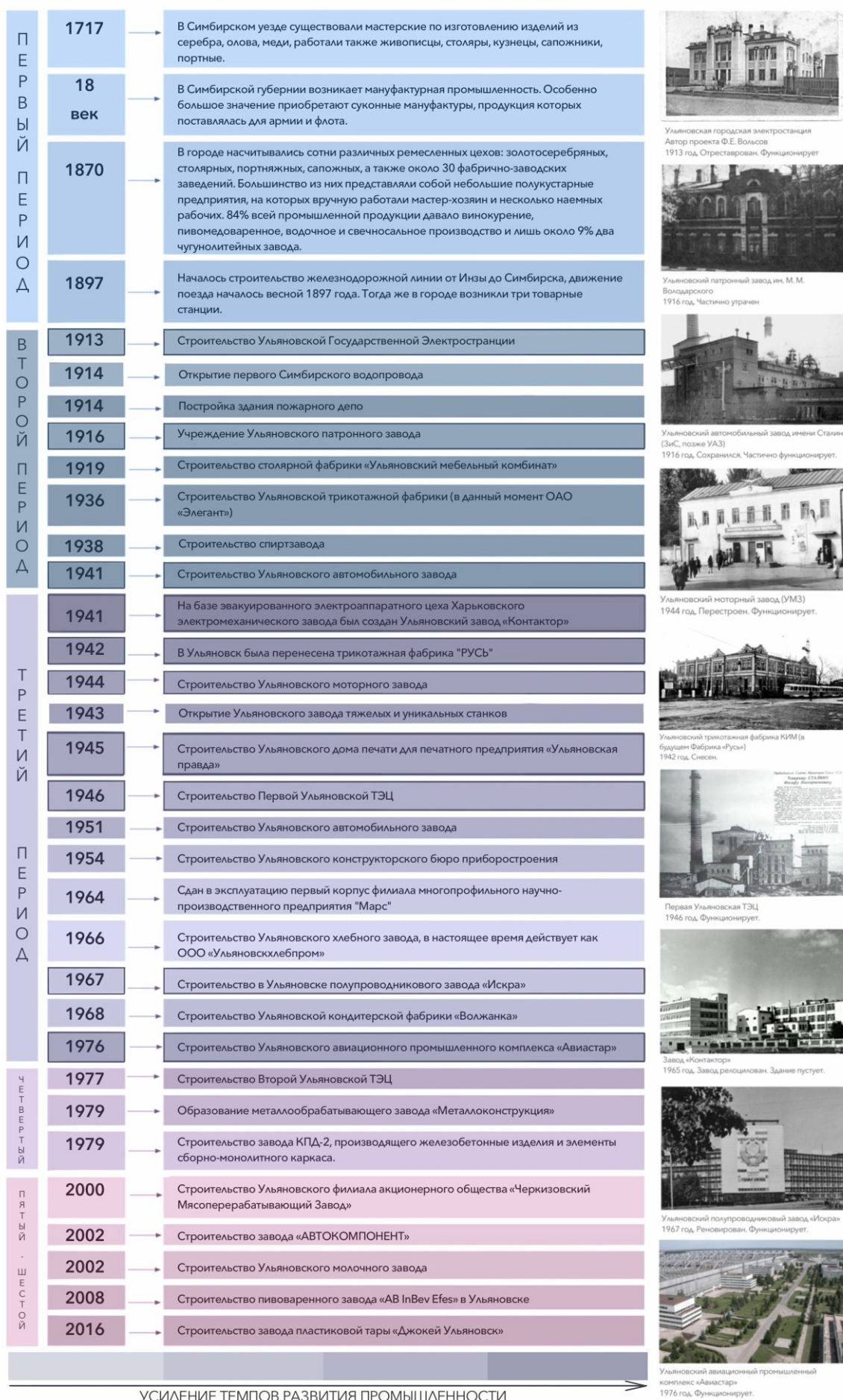


Рис. 3. Хронология строительства объектов градообразующей базы Ульяновска. Разраб. Грачева А.А.

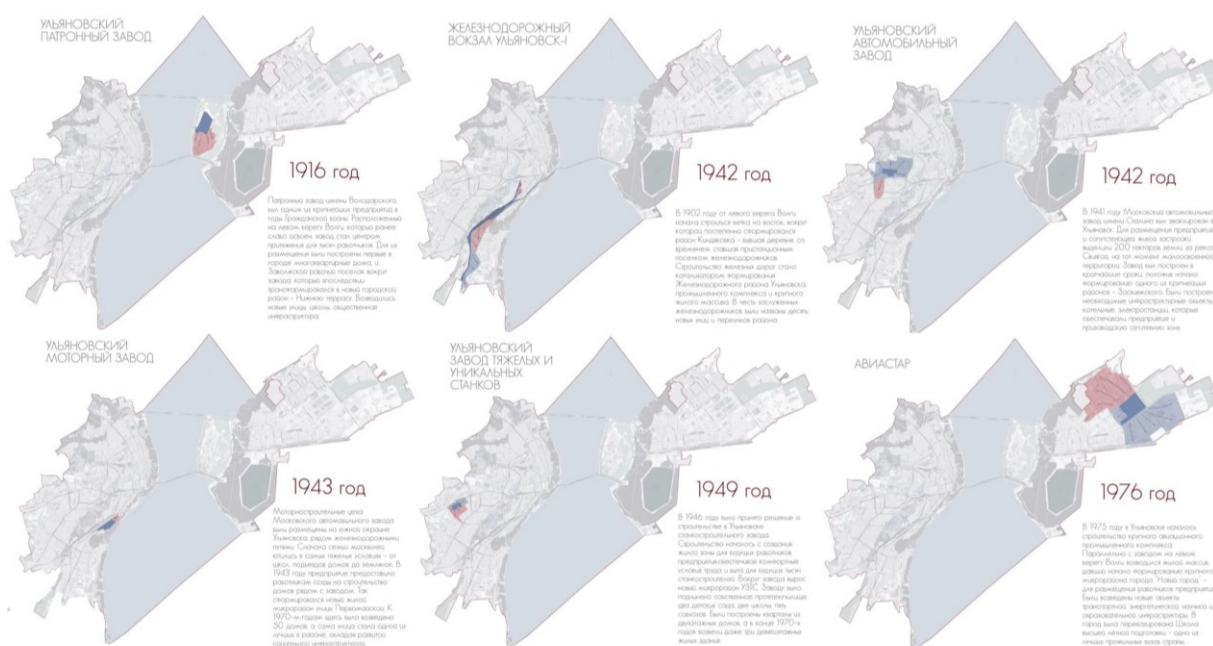


Рис. 4. Влияние наиболее крупных промышленных предприятий на пространственное развитие г. Ульяновска.
Разраб. Грачева А.А.

В настоящее время ключевым экономическим ресурсом Ульяновска являются промышленные предприятия. Промышленный комплекс Ульяновска насчитывает 2354 предприятия, в том числе 530 крупных и средних. В связи с технологическими изменениями и расширением жилой застройки, многие производства вынуждены были прекратить деятельность – одни по неспособности функционировать в новых городских условиях, другие из-за смены технологических процессов и возросших потребностей в интеллектуальном труде, третьи в силу утраты актуальности продукции. В результате около 40% промышленных территорий в настоящее время либо используются частично, либо вовсе не функционируют, что приводит к стагнации этих районов (рис. 5). Проблема стагнирующей промышленной застройки может быть решена путем ее адаптации к новой функции. Целесообразность рефункционализации обуславливается социальными, культурными и градостроительными факторами. Часть промышленных объектов обладают исторической ценностью и должны быть сохранены как часть культурной идентичности городской среды. Выявление наиболее рациональных методов их адаптации к современным функциям позволит создать инвестиционно-привлекательную среду и улучшить экологическое состояние территории [15]. Реновация промышленных территорий позволит также создать новые рабочие места и привлечь инвестиции, что будет способствовать экономическому развитию города [16] и улучшению качества жизни горожан [17].

Выводы. Анализ картографических материалов позволил выделить шесть основных этапов пространственного развития территории г. Ульяновска в зависимости градостроительного влияния промышленной базы города: 1) с момента основания крепости Синбирск до 1898 г.; 2) 1898–1941 гг. – этап становления промышленной базы города 3) 1941–1976 гг. – этап демографического роста и освоения новых территорий, расширения границ города; 4) 1976–1991 гг. – этап развития ведущих промышленных предприятий; 5) 1991–2010 гг. – этап стагнации; 6) 2010 г. – настоящее время. В этот период темпы промышленного производства в Ульяновске начали увеличиваться, появились новые предприятия, некоторые крупнейшие объекты градообразующей базы были модернизированы.

В результате ретроспективного анализа и периодизации выявлено, что наибольшее влияние на пространственное развитие территории оказали следующие крупные предприятия города: патронный завод (1916 год), железнодорожный вокзал Ульяновск-I (1942 год), автомобильный завод (1942 год), завод тяжелых и уникальных станков (1949 год), АВИАСТАР (1976 год). Строительство значимых объектов градообразующей базы повлекло формирование селитебных территорий, транспортной, инженерной и социальной инфраструктуры.

Сегодня значительная часть промышленных территорий находится в стадии стагнации. Для их адаптации и рационального использования, выявления стратегии развития требуется комплексный подход. Видится три пути решения

проблемы стагнирующих промышленных территорий и комплексов: сохранение производства с модернизацией технологических процессов; частичная рефункционализация с включением новых функций и адаптацией зданий и сооружений

под современное использование; полная рефункционализация территорий согласно критериям социально-культурной востребованности и экологичности.

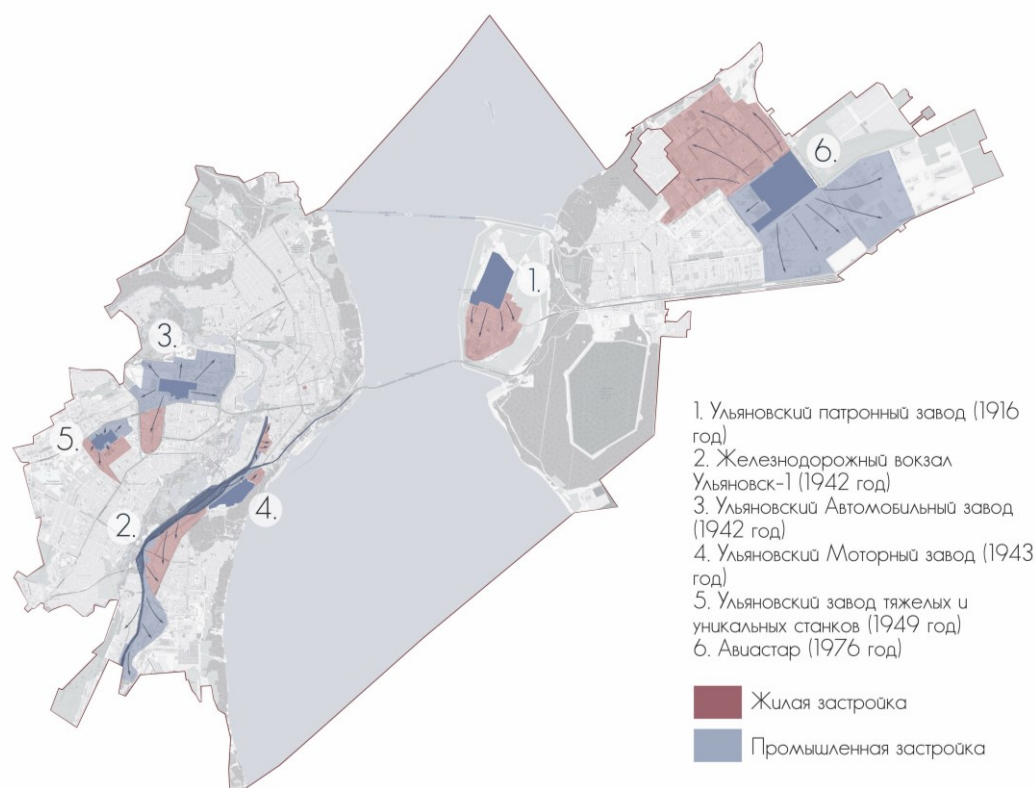


Рис. 5. Современное состояние промышленных территорий в структуре г. Ульяновска.
 Разраб. Грачева А.А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самогоров В.А., Пастушенко В.Л., Капитонов А., Капитонов М. Юбилейный Ульяновск. Ульяновск: Изд-во TATLIN, 2013. 208 с.
2. Отрасли, предприятия, учреждения Ульяновской области [Электронный ресурс]. URL: <https://ulrgo.ru/region/enc/otrasli-predpriyatiya-i-uchrejdeniya/> (дата обращения: 10.03.2024).
3. Ульяновская область в цифрах. 2023: Крат. стат. сб. Ульяновск, 2023. 122 с.
4. Грачева А.А., Перькова М.В. Роль формирования промышленных территорий в развитии г. Ульяновска // Сборник материалов Всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ» – Санкт-Петербург: 2024. С. 15–18
5. Гинеева А. В., Шаповаленко Я. И., Деркач Н. В. Промышленность как градообразующий фактор // Academy. 2017. №12 (27). С. 43–45.
6. Adaptation of Industrial Territories / M. Y. Drebezgova, M. V. Perkova, E. I. Ladik [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 175–184. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_13.
7. Кузнецов В.В. Об этапах развития экономики Ульяновской области // Проблемы современной экономики. 2006. № 3/4 (19/20).
8. Ромашин И.С. Очерки экономики Симбирской губернии XVII—XIX вв. Ульяновск, 1961. 52 с.
9. 116 ЛЕТ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ СИМБИРСКО – УЛЬЯНОВСКА [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ulzapovednik.ru/publikatsii/publikatsii/116-let-zheleznoy-doroge-simbirska-ulyanovska> (дата обращения: 5.03.2024).
10. Мухамедов Р.А., Карцев С.В. Промышленность Ульяновской губернии и ее влияние на региональные административные реформы // Промышленность: экономика, управление, технологии. 2014. №3 (52). С. 104–107.
11. Прохоров А.В. Эволюция факторов развития промышленности Ульяновской области в 1960-80-е гг. // XXIX Любимцевские чтения. Современные проблемы эволюции: сб. мат-лов междунар. науч. конф. Ульяновск: Изд-во УлГПУ, 2015. С. 242–248.

12.Кравченко Д. История и современность ульяновской электроники. Аргументы и факты [Электронный ресурс]. URL: <https://ul.aif.ru/legends/1032314> (дата обращения: 12.02.2024).

13.Промышленное производство в России. 2023: Стат.сб. М., 2023. 259 с.

14.Ульяновской области - 80! Как всё началось и чего достигло [Электронный ресурс]. URL: <https://ulpravda.ru/rubrics/nash-krai/ulianovskoi-oblasti--80-kak-vs-nachinalos-i-chego-dostiglo> (дата обращения: 12.02.2023).

15.Перькова М.В., Заикина А.С. Пути решения проблем деградирующих территорий в г.

Шебекино // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 58–63.

16.Перькова М.В., Цветкова Ю.П. Особенности сохранения и адаптации архитектурно-индустриального наследия сахарных заводов // Архитектура и современные информационные технологии. 2020. № 4(53). С. 135–151.

17.Перькова М.В., Найденова И.В. Особенности планировочной структуры и перспективы развития городов с преобладанием горнодобывающей промышленности // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 22-4. С. 31–35.

Информация об авторах

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

Грачева Анастасия Александровна, магистрант Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: saschagrachev00@gmail.com. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Ладик Елена Игоревна, кандидат архитектуры, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Дребезгова Мария Юрьевна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы архитектуры и дизайна. E-mail: mdrebezgova@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 27.01.2025 г.

© Перькова М.В., Грачева А.А., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю., 2025

Perkova M.V., Gracheva A.A., *Ladik E.I., Drebezgova M.Yu.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

**E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru*

INFLUENCE OF THE CITY-FORMING BASE ON THE SPATIAL DEVELOPMENT OF ULYANOVSK

Abstract. *The city of Ulyanovsk has been developing for a long time as a major transport and industrial center. The study presents a retrospective analysis of the formation of industrial territories, as well as the influence of the city-forming base on the spatial development of the city. Over time, with the development of trade and technology, the industrial complexes of Ulyanovsk became one of the key factors in the urban development and economic growth of the region. The study is based on the analysis of the historical evolution of the industrial development of the city of Ulyanovsk, the established "gray zones" and their influence on the architectural and urban structure of the city. The study analyzed archival and cartographic materials, conducted a retrospective and cartographic analysis. The analysis of cartographic materials made it possible to identify six main stages of the spatial development of the territory of Ulyanovsk, depending on the dynamics of the urban development influence of industry: The first stage (from the moment the fortress of Sinbirsk was founded until 1898); the second stage (1898-1941); the third stage (1941-1976); fourth stage (1976-1991); fifth stage (1991-2010); sixth period (2010 – present). Prospective directions for renovation of industrial territories and complexes are proposed: preservation of production with modernization and technological processes, partial refunctionalization with inclusion of new functions and adaptation for modern use, complete refunctionalization of territories.*

Keywords: *city, industrial areas, planning structure, retrospective analysis, spatial development*

REFERENCES

1. Samogorov V.A., Pastushenko V.L., Kapitonov A., Kapitonov M. Jubilee Ulyanovsk. Ulyanovsk [Yubilejnyj Ulyanovsk] TATLIN Publishing House, 2013. 208 p. (rus)
2. Industries, enterprises, institutions of the Ulyanovsk region [Otrasli, predpriyatiya, uchrezhdeniya Ulyanovskoj oblasti] URL: <https://ulrgo.ru/region/enc/otrasli-predpriyatiya-i-uchrezhdeniya/> (date of access: 10.03.2024). (rus)
3. Ulyanovsk region in figures [Ulyanovskaya oblast' v cifrah] 2023: Brief stat. collection. Ulyanovsk, 2023. 122 p. (rus)
4. Gracheva A.A., Perkova M.V. The role of the formation of industrial territories in the development of Ulyanovsk [Rol' formirovaniya promyshlennyyh territorij v razvitii g. Ulyanovska] Collection of materials of the All-Russian conference "ISI Science Week" - St. Petersburg: 2024. Pp. 15–18 (rus)
5. Gineeva A.V., Shapovalenko Ya.I., Derkach N.V. Industry as a city-forming factor [Promyshlennost' kak gradoobrazuyushchij faktor] Academy. 2017. No. 12 (27). Pp. 43–45. (rus)
6. Drebezgova M.Y., Perkova M.V., Ladik E.I. Adaptation of Industrial Territories. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 227. Pp. 175–184. DOI 10.1007/978-3-030-94770-5_13.
7. Kuznetsov V.V. On the stages of development of the Ulyanovsk region economy [Ob etapah razvitiya ekonomiki Ulyanovskoj oblasti] Problems of modern economics. 2006. No. 3/4 (19/20). (rus)
8. Romashin I.S. Essays on the economy of the Simbirsk province in the 17th-19th centuries [Ocherki ekonomiki Simbirskoj gubernii XVII—XIX vv.] Ulyanovsk Ulyanovsk, 1961. 52 p. (rus)
9. 116 years of the simbirsk - ulyanovsk railway [116 let zheleznoj doroge simbirsk – ul'yanovska]. URL: <https://www.ulzapovednik.ru/publikatsii/publikatsii/116-let-zheleznoy-doroge-simbirsk-ulyanovska> (date of access: 5.03.2024). (rus)
10. Mukhamedov R.A., Kartsev S.V. Industry of the Ulyanovsk province and its influence on regional administrative reforms [Promyshlennost' Ulyanovskoj gubernii i ee vliyanie na regional'nye administrativnye reformy] Industry: economics, management, technology. 2014. No. 3 (52). Pp. 104–107. (rus)
11. Prokhorov A.V. Evolution of factors of industrial development of the Ulyanovsk region in the 1960-80s [Evolyuciya faktorov razvitiya promyshlennosti Ulyanovskoj oblasti v 1960-80-e gg] XXIX Lyubishchev readings. Modern problems of evolution: collection of materials of the international. scientific conf. Ulyanovsk: Publishing house of Ulyanovsk State Pedagogical University, 2015. Pp. 242–248. (rus)
12. Kravchenko D. History and modernity of Ulyanovsk electronics. Arguments and facts [Istoriya i sovremennost' ul'yanovskoj elektroniki. Argumenty i fakty]. URL: <https://ul.aif.ru/legends/1032314> (date of access: 12.02.2024). (rus)
13. Industrial production in Russia [Promyshlennoe proizvodstvo v Rossii] 2023: Stat.sb. M., 2023. 259 p. (rus)
14. Ulyanovsk region - 80! How it all began and what it has achieved [Ulyanovskoj oblasti - 80! Kak vsyo nachinalos' i chego dostiglo]. URL: <https://ulpravda.ru/rubrics/nash-krai/ulianovskoi-oblasti--80-kak-vs-nachinalos-i-chego-dostiglo> (date of access: 12.02.2023). (rus)
15. Perkova M.V. Ways to solve the problems of degrading territories in the city of Shebekino [Puti resheniya problem degradiruyushchih territorij v g. SHEbekino]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 58–63. (rus)
16. Perkova M.V., Tsvetkova Yu.P. Features of the preservation and adaptation of the architectural and industrial heritage of sugar factories [Osobennosti sohraneniya i adaptacii arhitekturno-industrial'nogo naslediya saharnyh zavodov] Architecture and modern information technologies. 2020. No. 4 (53). Pp. 135–151. (rus)
17. Perkova M.V., Naidenova I.V. Features of the planning structure and development prospects of cities with a predominance of the mining industry [Osobennosti planirovochnoj struktury i perspektivy razvitiya gorodov s preobladaniem gornodobyvayushchej promyshlennosti] Trends in the development of science and education. 2017. No. 22-4. Pp. 31–35. (rus)

Information about the authors

Perkova, Margarita V. Doctor of Architecture, Professor. E-mail: perkova.margo@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia.

Gracheva Anastasia A., graduate student E-mail: saschagrachev00@gmail.com. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Ladik, Elena I. PhD, assistant professor. E-mail: krushelnitskaya1@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Drebezgova, Mariya Y. PhD. E-mail mdrebezgova@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, st. Politekhnikeskaya, St. Petersburg, 195251, Russia.

Received 27.01.2025

Для цитирования:

Перькова М.В., Грачева А.А., Ладик Е.И., Дребезгова М.Ю. Влияние градообразующей базы на пространственное развитие г. Ульяновска // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 45–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-45-59

For citation:

Perkova M.V., Gracheva A.A., Ladik E.I., Drebezgova M.Yu. Influence of the city-forming base on the spatial development of Ulyanovsk. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 45–59. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-45-59

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-60-72

*Арслан М.И., Качемцева Л.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОВЕТСКИХ РАБОЧИХ ПОСЕЛКОВ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В 1930-Х ГОДАХ (НА ПРИМЕРЕ СОЦГОРОДКАГ. ВАЛУЙКИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Аннотация. Статья посвящена идеологическим и архитектурно-планировочным закономерностям формирования рабочих поселков периода советской индустриализации 1930-х гг. Особенность исследования заключается в изучении данных закономерностей на примере Соцгородка города Валуйки Белгородской области, на территорию которого в настоящее время находится жилой микрорайон. Актуальность вопроса формирования и функционирования рабочих поселков, как и крупных соцгородов, обусловлена тем, что такие образования являются уникальным градостроительным явлением начала XX века, они символизируют стремительный процесс перестройки государственного аппарата в образовавшемся СССР и демонстрируют результаты политики индустриализации страны в предвоенный период. Отмечены проблемы советского опыта формирования, поддержания и восстановления рабочих поселений. Авторами статьи рассмотрены ключевые принципы организации системы управления рабочими поселениями, выделены приемы и рекомендации планирования таких градостроительных объектов, обозначен порядок зонирования участка проектирования и строительства, характер возводимых зданий и сооружений на конкретном примере построенного в тот период и сохранившего свою градостроительную структуру рабочего поселка Соцгородок. Такой всесторонний анализ государственной политики социалистического расселения демонстрирует ее особенности и на уровне концепции, и на уровне формирования основных принципов градостроительного проектирования. Выявлены особенности реализации концепции формирования рабочих поселков на примере Соцгородка г. Валуйки Белгородской области.

Ключевые слова: социалистическое расселение, рабочий поселок, соцгород, архитектурно-планировочная организация, градостроительные принципы.

Введение. В мировой практике градостроительства проектирование и строительство промышленных поселений начало активно развиваться с середины XIX века. Эти поселения массово возводились в странах, переживающих индустриализацию, и принимали различные формы, такие как промышленные деревни, заводские города, корпоративные города и фабричные села. При этом изменялись подходы и принципы их архитектурно-планировочного устройства. В нашей стране эти процессы особенно актуализировались в советский период в предвоенные годы. Во второй половине XX века строительство промышленных поселений прекратилось. Последними такими объектами стали специальные поселения для интернированных японцев в США во время Второй мировой войны и соцгорода в СССР, возводившиеся в период послевоенного восстановления промышленности [1].

Большинство отечественных рабочих поселков, пережив советский период, находятся в настоящее время в упадке и требуют исследования и восстановления. Заграничный опыт, показывает, что при ответственном отношении к исторической застройке, рабочие поселки могут не

только сохраняться в хорошем состоянии, но и продолжать выполнять свои функции [2].

Идея социалистического расселения в Советском Союзе в 1930-е гг. возникла на почве принятой программы индустриализации или, другими словами, начала «построения социализма». Однако, единой продуманной градостроительной концепции «социалистического города» к этому времени не было. В первые годы советской власти архитекторы активно развивали концепцию «города-сада», однако в 1920-е годы социалистическое государство отказалось от этой идеи по идеологическим причинам. Концепция «города-сада» проявлялась в коттеджных зеленых поселках с индивидуальным ведением хозяйства, в то время как социализм продвигал коллективный образ жизни рядом с промышленными предприятиями. Таким образом, концепция «города-сада» была заменена доктриной советского рабочего поселка, который также представляет собой моноструктурную градостроительную систему, подобную городу-саду [3].

С момента изменения градостроительной политики рабочие поселки активно распространяются по всей территории СССР, демонстрируя

соединение приоритетов жизни вокруг промышленных объектов с идеологией значимости пролетариата в социалистическом обществе. Согласно статистическим данным, в 1925 г. в РСФСР было всего 9 рабочих поселков, в 1927 г. их уже насчитывалось 57, в 1930 г. – 345, в 1933 г. – 434, дальше эти показатели только растут [4]. Процесс индустриализации с продвижением строительства рабочих (промышленных) поселков настиг и территорию нынешней Белгородская область, благодаря своему выгодному географическому положению вблизи Донецкого угольного бассейна и угольно-металлургических центров, а также наличию благоприятных почвенно-климатических условий, развитой железнодорожной инфраструктуры и значительного людского потенциала, обладает большими возможностями для развития. Соцгородок г. Валуйки Белгородской области – один из характерных примеров рабочих поселков предвоенного периода, сохранивший в целом свою градостроительную структуру и архитектурные особенности до нашего времени, что делает его значимым для современного исследования.

Существует сложность изучения материалов планов рабочих поселений, т.к. многие из них утеряны или хранятся в закрытых архивах, а наиболее изученные планы относятся к территориям Московской и Ленинградской областей; малые и отдаленные от центра рабочие поселения приходится исследовать по старым картам и спутниковым снимкам. Многим сохранившимся застройкам рабочих поселков не нашли современного применения, и они пришли в упадок, некоторые из них были разрушены в военное время; несмотря на удачное градостроительное расположение бывшие советские рабочие поселки не развиваются и остаются пережитком идеологии социализма.

Цель исследования — изучить особенности реализации градостроительных и социально-бытовых принципы организации советских рабочих поселений на примере Соцгородка г. Валуйки Белгородской области.

Объект исследования — рабочий поселок Соцгородок г. Валуйки Белгородской области.

Предмет исследования — градостроительные особенности рабочего поселка Соцгородок, как результат реализации принципов проектирования советских рабочих поселений предвоенного периода.

Задачи исследования:

1. проследить связь концепций «города-сада» и советского рабочего поселка и «соцгорода»;

2. проанализировать содержание градостроительной политики советского правительства в 1930-х гг;

3. выделить основные принципы проектирования и строительства рабочих поселений;

4. выявить особенности реализации концепции формирования рабочих поселков на примере Соцгородка г. Валуйки Белгородской области.

Материалы и методы.

Авторами исследования применялся комплексный подход. В ходе работы использованы методы сравнительного, ретроспективного, градостроительного анализа, фотофиксация, натурное обследование, изучение теоретических и исторических материалов. Проведена графоаналитическая работа, разработаны схемы организации и зонирования рабочего поселка в пределах современного микрорайона «Соцгородок» г. Валуйки.

В советский период в 1930-х гг. появились отечественные публикации на тему градостроительного формирования и развития соцгородов и рабочих поселений. Милютин Н. А. – председатель правительственной комиссии по строительству новых городов в своей книге 1930-ого г. рассматривает проблемы строительства социалистических городов и поселений в рамках рассматриваемой эпохи. Автор описывает практические результаты планирования подобного рода поселений, основанных на идейных установках советского индустриального развития [5]. Еще один советский автор, Куренной М.И. детально анализирует последовательный процесс проектирования рабочих поселков, рассматривает вопросы архитектурно-планировочного построения генеральных планов, озеленения и санитарно-технического устройства, подкрепляет все материалы практическими примерами застроек [4]. Мещеряков Н. в 1931 г. издает сборник статей о социалистических городах [6], о возникновении советских соцгородов и рабочих поселках упоминается и в книге Борового А.А. [7] и в других изданиях о советском планировании населенных пунктов в период индустриализации.

С современной точки зрения концепцию «соцгорода» и ее реализации рассматривал Меерович М.Г., автор посвятил данной теме большую часть своей научной деятельности. Меерович написал книгу на тему жилищной политики СССР в контексте одного из способов управления советским населением [8], издал несколько научных статей о понятии соцгорода и рабочего поселка с точки зрения утопической концепции [9], сравнивал эту концепцию с концепцией «города-сада» в своей диссертации 2016 года [10]. Другие современные авторы также уделяли вни-

мания теме социалистического расселения первой пятилетки СССР, к ним можно отнести научный труд Гордина А.А.

Что касается иностранной литературы, то вопросами «социального расселения», градостроительными особенностями в период промышленной революции занимались такие авторы как Fernández Agueda, B.; Berg, M.; Burke, P., о советской практике «социального расселения» рассуждали Lennart Samuelson [11]; Barbara Engel [12]. Данные деятели науки больше акцентируют внимание на явлении «социализма» в целом и на использование концепций «идеального города» в государственном управлении.

Несмотря на то, что изучение теории и практики советского градостроительства довоенного периода ведется достаточно активно и разносторонне, как правило, градостроительное наследие Белгородской области 1930-х гг. остается за рамками рассмотрения исследователей.

Основная часть. Согласно историческим данным, в начале XX в. отечественная градостроительная теория прошла сложный путь от идеи города-сада до концепции типа - «социалистический город». Концепция города-сада, предложенная в конце XIX в. английским философом и социологом Говардом, была с большим воодушевлением принята российскими архитекторами и градостроителями. В предреволюционные и первые послереволюционные годы в нашей стране основные принципы этой концепции оказывали большое влияние на градостроительную практику того времени. Но некоторые важные основы идеи города-сада все же иногда игнорировались, и не столько с архитектурно-планировочной точки зрения, сколько с позиции ведения управления и организации быта. Поселения-сады возводились без образования кооперативных товариществ, владельцами становились зажиточные граждане, которые завышали стоимость жилищной площади и земельных участков, ограничивая возможность малоимущим семьям равноценно развивать хозяйство. В результате, города-сады в исходной версии были отменены по условиям государственной политики, вместо них началось продвижение идеи «социалистического расселения» и формирование рабочих поселков и соцгородов, в градостроительное устройство которых легли основы концепции города-сада с некоторыми существенными отличиями.

Концепции имели схожие черты, включая:

1. особенности планировки,
2. принципы зонирования,
3. соотношение территорий и так далее.

Однако они отличались по следующим аспектам:

1. значению промышленного предприятия в композиции планировочной структуры;
2. характеру землепользования и землеустройства;
3. отсутствию прав собственности на землю и жилье;
4. типологии зданий в жилой и административной зонах [3].

В широком смысле архитектурно-планировочная структура соцгорода или рабочего поселка представляла собой самостоятельную замкнутую поселенческую единицу на территории промышленного предприятия, имеющую стабильный размер и фиксированное число жителей, зависящее от количества рабочих мест на фабрике или другом промышленном предприятии [9]. Советские рабочие поселки выполняли одну из своих основных функций – прикрепление населения к месту работы и его социальный фильтр – через исключительно государственную форму собственности на жилье и землю, распределение и распоряжение ею. В этих условиях они не имели права развивать собственное хозяйство и должны были работать только на благо поселка в целом [3].

Ключевой причиной смещения государственной политики от формирования городов-садов, поселений-садов в сторону строительства соцгородов и рабочих поселений является запрос наступившей индустриализации 1930-х гг. на промышленное развитие страны.

Дискуссия о социалистическом расселении проходила в 1929–1930 гг. Наиболее подробно изложить ее содержание попыталась Хазанова В. Э. в монографии «Советская архитектура первой пятилетки: Проблемы города будущего» [13]. Однако, в рукописи нет ответа на вопрос, почему дискуссия была закрыта. Изначально обсуждения планов становления «социализма» или советской индустриализации начались с противостояния основных градостроительных направлений «дезурбанизации» (М. Охитович) и «урбанизации» (Л. Сабсович), из которых выявлялось много противоречий интересов социалистического общества. Дискуссия заканчивается в 1930 г. постановлением ЦК ВКП (б) «О работе по перестройке быта» [14], содержанием которого были следующие некоторые пункты, перефразированные авторами исследования:

1) Указания о правилах постройки рабочих поселков и отдельных жилых домов для трудящихся в парадигме общественного обслуживания быта трудящихся, как в новостроящихся, так и в существующих городах и поселках (для СНК Союза).

2) *Требование при строительстве рабочих поселков при новых крупных предприятиях обеспечить достаточную зеленую полосу между производственной и жилой зонами, пути и средства сообщения и предусмотреть оборудование этих поселков водопроводом, электрическим освещением, медпомощью и разными общественными учреждениями гигиены, питания и образования. Также принять все меры к максимальному удешевлению строительства. и т.д.*

После принятия постановлений споры не прекратились, и только спустя время, наконец, утвердили проект постановления для Правительственной Комиссией при СТО по вопросу перестройки быта [15], который имел первоначальную и итоговую части [16]. Милютин Н.Л. внес весомый вклад в становление проектирования рабочих поселений, при этом, он был сильно раскритикован государственными властями за некоторые аспекты, касающиеся социалистического переустройства. Проект постановления вновь и вновь редактировался, в результате чего, сильно сократилось количество его пунктов. Как отметил Меерович М.Г.: «Сравнение показывает, что из проекта постановления исчезло все, что могло стать гарантией реального вложения государственных сил и средств в повышение комфорта среды обитания в существующих и возводимых поселениях» [17].

Для советского правительства «Все новые города (рабочие поселки) возводимые при вновь строящихся крупных промышленных предприятиях, должны строиться, как города последовательно-социалистического типа. В этих городах жизнь должна быть организована на началах максимального обобществления удовлетворения бытовых и культурных потребностей трудящихся, при наиболее рациональном и полном использовании всех трудовых ресурсов населения, в частности, наиболее полного производительного использования труда женщин наравне с трудом мужчин».

Куренной М.И. в своей книге указывает на отличие рабочих поселков от более крупных соцгородов [4].

- *Рабочий поселок – однородный жилой район, а соцгород состоит из нескольких районов: жилого, промышленного, транспортного и т.д.;*

- *Рабочий поселок имеет одного застройщика, а соцгород – это разнообразный и сложный административный организм;*

- *Рабочий поселок – частично обслуживающий пункт для прилегающего района, соцгород оказывает влияние на весь район.*

В книге также приводится типология советских рабочих поселков. Рабочие поселки различаются по производственно-экономическому и административному значению, по размеру и характеру застройки.

Типология по Куренному М.И. [4]:

- Рабочие поселки возникают при предприятиях и промыслах, шахтах и рудниках, ж/д станциях и электростанциях, при портах, аэродромах и тому подобных сооружениях;

- Поселки могут размещаться либо самостоятельно и вдали от городов, либо вблизи или на окраине их;

- Рабочие поселки бывают постоянные с капитальной застройкой (каменные, благоустроенные 2-х этажные и более дома), временные с застройкой облегченного типа (деревянные, упрощенно благоустроенные 1-но этажные дома) и поселки со смешанным типом застройки;

- Поселки делятся по величине в зависимости от численности населения: малые (до 3-5 тыс. чел.); средние (до 10-15 тыс. чел.); большие (до 20-25 тыс. чел.).

Город Валуйки расположен на высоком правом берегу р. Валуй, в 3 км от её впадения в р. Оскол, в 160 км к юго-востоку от Белгорода. Соцгородок — микрорайон города Валуйки, бывший посёлок городского типа (с 1940 г.) на тот момент Курской позже Белгородской области. Микрорайон (площадь 2,7 км²), расположен на южной окраине города Валуйки, возле действующей ж/д станции Валуйки-Сортировочная. Соцгородок возник в 1932 г., как посёлок работников железнодорожного транспорта при сортировочной станции, паровозном и вагонном депо, обслуживавших строящуюся магистраль Москва – Донбасс [18].

Таким образом, советский рабочий поселок г. Валуйки относился к типу поселков, возникших у ж/д станций, расположенных на окраине города и по количеству населения, считался малым. Что касается того, являлся ли поселок временным, постоянным или смешанным, то тут для подтверждения необходимо изучить схемы карт, спутниковые снимки, фотоснимки разных временных периодов.

После Великой Отечественной Войны информацию об организации рабочего поселка «Соцгородок» собирали из воспоминаний местных жителей-ветеранов, населяющих рабочий поселок в период социализма [19]. Материалы содержали описания улиц и домов. Согласно им, жилые дома в рабочем поселке выстраивались однотипными и двухэтажными, они рассчитывались на 8 квартир, многие из них сохранились и

по сей день. Информацию подкрепляют фотографии очевидцев послевоенного времени и современная фотофиксация (рис. 1).



Рис. 1. Фотография дома № 8 по ул. Пархоменко в настоящее время и в 50-е годы соответственно [19]

Представленные снимки свидетельствуют о том, что жилые корпуса рабочего поселка были каменные и выстраивались в виде постоянной капитальной застройки. Старожилы рабочего поселка «Соцгородок» подтверждают, что основной квартал территории поселка составляли

улицы Дзержинского, Фурманова, Котовского и Пархоменко, очертания которых демонстрирует немецкий спутниковый снимок Валуйского Соцгородка от 24 декабря 1941 года [20], эти же улицы можно увидеть на современных космоснимках и картографиях [21] (рис. 2).



Рис. 2. Спутниковый снимок и карта-схема современного микрорайона «Соцгородок» [21] в сравнении с немецким спутниковым снимком рабочего поселка «Соцгородок» 1941 года [20]

Принципы застройки рабочих поселков и соцгородов базировались на восьми пунктах итогового проекта постановления для Правительственной Комиссией при СТО [16]. Подробно и поэтапно, в рамках исторического материала описан процесс застройки рабочих поселков в книге Куренного М.И. 1956 года, однако, обобщенно, в контексте настоящего времени, фокусируя внимание на поиске ключевых приемов и рациональных идей, процесс организации застройки описан в книге Милютин Н.А. 1930 года [5]. Милютин Н.А. в своей книге «Соцгород.

Проблема строительства социалистических городов. Основные вопросы рациональной планировки и строительства населенных мест СССР» категорично настаивает на своей точке зрения на принципы архитектурного планирования, дает оценку выбору территории, функциональному устройству и т.п.; выявляет проблемы градостроительства того времени и предлагает свои правильные решения.

Выбор пунктов нового строительства по Милютину Н.А.:

- Первоочередное внимание следует уделять интересам правильной организации производства с учетом потребностей населения;

- Не стоит механически следовать за существующими городами и транспортными линиями;

- Необходимо избегать концентрации в одном пункте разнородных предприятий, которые не связаны между собой производственными процессами;

- На базе новых поселений должна быть правильно решена задача связи промышленности и сельского хозяйства.

Анализируя планы уже построенных в 30-е года рабочих поселков, их архитектурно-планировочные качества Куренной М.И. выводит следующие рекомендации при выборе участка проектирования:

- Участок должен быть расположен в хороших природных условиях, среди зелени, вблизи водного бассейна, защищен от влияния резких ветров, вместе с устойчивыми грунтами, с наличием источника питьевой воды и места для спуска сточных вод;

- Территория должна иметь достаточные размеры под планируемое население и обладать резервными площадями для дальнейшего развития;

- Для уменьшения стоимости прокладки коммуникаций участок следует выбирать с небольшим уклоном, лучше, в южную сторону для освещенности и просыхания почвы;

- Если через участок проходит транзитные транспортные пути, то поселок следует располагать так, чтобы эти пути не пересекали его;

- Участок должен иметь удобную связь с районами, близлежащими населенными пунктами и внешними путями сообщения.

Милютин сформулировал основы выбора участка проектирования на уровне концепции, Куренной разобрал их с точки зрения реализации.

Относительно данных рекомендаций рабочий поселок «Соцгородок» имеет достаточно благоприятное расположение. Его территория занимает земли, расположенные вблизи водных русел Валуй и Оскол, с рельефом, понижающимся в юго-восточном направлении. Участок поселка не пересекают ж/д пути, и он имеет транспортные связи с центральной частью города Валуйки. Из недостатков можно выделить заболоченность окружающей территории и возможный недостаток озеленения в период формирования (если оценивать старые топографические карты). Все вышесказанное демонстрирует Карта РККА М-37 (А). Курская, Белгородская, Воронежская и Харьковская области. 1941 г. [22], для подтверждения особенностей рельефа, к карте приложена цветная топографическая схема в левом верхнем углу (рис. 3).



Рис. 3. Схема рабочего поселка Соцгородок г. Валуйки на основе топографической карты РККА М-37 (А). Курская, Белгородская, Воронежская и Харьковская области. 1941 г. [22]

Все планировочные решения рабочих поселений в общем могут быть разделены на регулярно-геометрический и свободно-ландшафтный композиционные приемы [4]. Оценивая участок Соцгородка г. Валуйки, можно отметить, что для планировки основной части поселка использован регулярно-геометрический принцип, для остальных частей более характерен свободно-ландшафтный композиционный прием. Такая планировка во многом связана с характером рельефа участка, а также с организацией железнодорожных путей. Архитектурно-планировочные решения рабочих поселков предполагали определенные, принципы зонирования территории. В рамках исследования рассмотрим их с позиции Милютин Н.А. [5].

Принципы планировки:

- Производственные подразделения должны быть рационально связаны друг с другом и с транспортными магистралями. Функциональная система поточных линий (кратчайших прямых) должна стать важнейшей основой новой планировки;

- Поселки (коммунальное жилье, жилые районы, детские корпуса и т.д.) должны располагаться параллельно производственным территориям и отделяться от них зелеными поясами;

- Железнодорожные пути должны располагаться за производственными зонами, т.е. за линиями промышленных зданий, а автомобильные дороги - между производственными и поселковыми зонами (в зеленом поясе);

- Сельскохозяйственные территории должны располагаться за жилыми районами;

- Территории, отведенные под специальные здания высших и средних технических и сельскохозяйственных учебных заведений, следует размещать в соответствующих промышленных и сельскохозяйственных зонах;

- Поликлиники следует переносить в районы поселений, а больницы - в наиболее здоровые районы за чертой поселений;

- Здания школ должны быть связаны с соответствующими детскими учреждениями; эти учреждения должны быть связаны с культурно-бытовыми учреждениями и производственными предприятиями;

- Коммунальные предприятия производственного типа и склады следует размещать в производственных районах на основе решения вопроса о наиболее рациональном обслуживании населенного пункта в целом.

Исходя из данных принципов формируется следующий порядок зонирования:

1. территория железнодорожных путей;

2. территория производственных предприятий, коммунальных предприятий, складов, станционных сооружений и соответствующих научно-технических учебных заведений; и

3. зеленая зона с магистралями;

4. жилые зоны:

- a. общественные объекты

- b. жилые кварталы

- c. детские зоны, например, ясли, детские сады, школы-интернаты;

5. парковые зоны с объектами рекреации, спортивными площадками, бассейнами и т.д.

6. совхозные зоны садоводства, молочного животноводства и огородничества.

По информации жителей бывшего рабочего поселка основные предприятия Соцгородка — это ж/д предприятия: паровозное депо, вагонное депо (1935 г.), станция Валуйки (ДС). В поселении также имелись: электростанция (1924 г.), пилорама (1932 г.), столярная мастерская (1932 г.), пожарная часть, военизированная охрана, хлебопекарня, столовые, овощехранилища и магазины ОРСа, бани. Все эти здания располагались в основном в южной и юго-западной части рабочего поселка. Школьное и культурное учреждения разделяли жилой квартал и находились по улицам Фурманова и Котовского, предположительно, эта же территория относилась к парковой зоне. По данным топографических карт 1930-1940-х гг. на месте нынешней парковой территории «Колхозный сад» располагался колхоз, а станция Валуйки-Сортировочные обозначалась товарной станцией и занимала тот же участок ж/д путей, что и в настоящее время [22, 23]. Такой состав зданий и сооружений небольшого рабочего поселка намечал в своей книге Куренной, он также отмечал обязательное наличие общественной площади в структуре рабочего поселения [4]. В Соцгородке функции общественного центра выполняла улица Центральная.

На основе описаний Соцгородка жителями-очевидцами и данных карт, и советского, и настоящего времени, была составлена схема предполагаемого зонирования рабочего поселка г. Валуйки с пояснениями и укрупненной схемой положения Соцгородка в городе (рис. 4).

Представленная схема демонстрирует, что рабочий поселок «Соцгородок» г. Валуйки имел архитектурно-планировочные решения, не вполне соответствующие выделенным принципам проектирования Милютин, однако, не все зоны поселка удалось подтвердить историческими или картографическими источниками, возможно, некоторые из отмеченных зон имели другие границы. Кроме того, принципы планировки Милютин диктовали общие концептуальные решения идеи социального расселения.



Рис. 4. Схема территориального зонирования рабочего поселка «Соцгородок» г. Валуйки периода 1930-1940-е гг. в современных границах микрорайона [23, 24]. Схема авторов

Многие промышленные и коммунальные здания бывшего рабочего поселка «Соцгородок» сохранились, и в настоящее время их оборудовали под другое назначение (магазины, предпринимательские организации) или они превратились в заброшенные сооружения. Как было упомянуто ранее, застройка жилых двухэтажных корпусов существует по сей день и используются по своему назначению. Школа и культурные учреждения были перестроены, а утративший свои функции колхоз преобразился в парк со

спортивным комплексом и велосипедными маршрутами [19, 24]. В рамках исследования авторами статьи разработана функциональная схема зданий и сооружений бывшего рабочего поселка Соцгородок г. Валуйки периода 1930-1940-е гг. в современных границах микрорайона с пояснениями и указанием положения участка застройки на Карте РККА М-37 (А). Курская, Белгородская, Воронежская и Харьковская области. 1941 г. в левом верхнем углу (рис. 5).

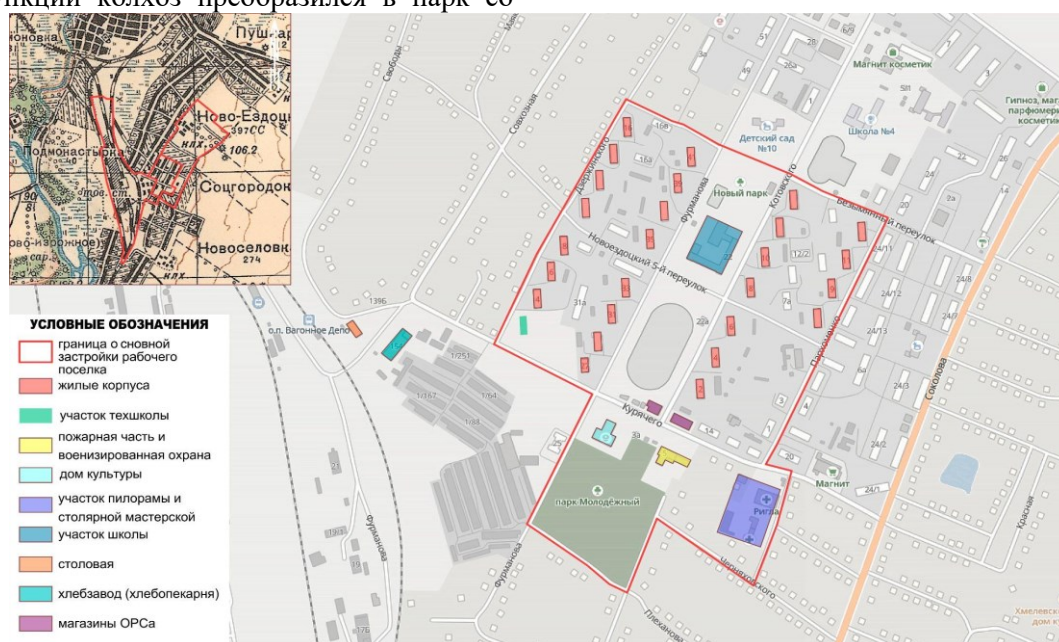


Рис. 5. Функциональная схема зданий и сооружений бывшего рабочего поселка Соцгородок г. Валуйки периода 1930-1940-е гг. в современных границах микрорайона. Схема авторов.

К разработанной схеме рисунка 5 прилагаются фотографии современных обликов зданий и

сооружений бывшего рабочего поселка г. Валуйки (рис. 6, 7).

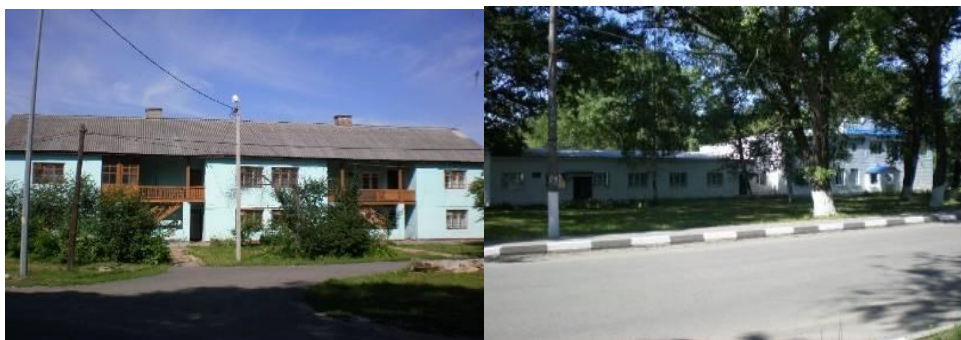


Рис. 6. Фотография дома № 35 по улице Фурманова и фотография здания бывшей ж/д поликлиники соответственно [19]



Рис. 7. Фотографии заброшенной хлебопекарни «Хлебзавод» с торговым ларьком «Горячий хлеб» [25]

Рабочие поселки строились во многих странах мира, и в общем смысле их целью было создание благоприятных условий для работы и жизни рабочих вблизи своих предприятий. Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта проектирования рабочих поселков показал, что европейские рабочие поселки находятся достаточно далеко от городов, в то время как в России все необходимые структуры находятся рядом, но микрорайоны страдают от перенасыщения функциями. Невозможно сбалансировать все и сразу, и что-то все равно остается на втором плане. В других странах это транспортная доступность и развитая инфраструктура, а в России, наоборот, на задний план отходят комфорт и доступность жилья [2].

Выводы. В основе концепций соцгородов и советских рабочих поселков, как и концепции городов-садов, лежит идея «идеального города», в котором население, объединенное аргументированной идеологией, с помощью коллективного труда в одинаковых условиях строит равноправное и справедливое государство. И если по формальным признакам в этих концепциях можно обнаружить сходство, содержательно они различаются. В основе расхождения этих концепций лежат разный характер землепользования, прав собственности на землю и жилище и различные идеологические основания.

Рабочие поселки и соцгорода 1930-х гг. периода советской индустриализации возводились с целью формирования «коммуны», в которой бы быт, сельское хозяйство и производство осуществлялось бы сплоченным, равноправным, а главное, управляемым коллективом.

Идея социалистического расселения имела множество противоречий еще на этапе обсуждений, после принятия проекта развития строительства соцгородов и рабочих поселений, архитекторы столкнулись с рядом функциональных и экономических проблем.

Социально-экономические условия и градостроительные принципы рабочих поселков не всегда возможно было удовлетворить из-за географических и природно-климатических особенностей промышленных территорий страны, для устранения связанных с этим проблем концепция социалистического расселения была недостаточно гибкой.

Со временем при строительстве рабочих поселков приоритеты комфортности жилищно-бытовых условий были задвинуты на задний план, но обеспечивалась эффективность рабочего процесса. К этому преимуществу относятся внешняя и внутренняя транспортно-пешеходная доступность, и многофункциональность социалистических поселений.

В процессе исследования выявлены градостроительные и архитектурные особенности реализации принципов формирования советских рабочих полков на примере Соцгородка г. Валуйки:

1. советский рабочий поселок г. Валуйки относился к типу поселков, возникших у ж/д станций, расположенных на окраине города и по количеству населения, считался малым, его жилые корпуса выстраивались в виде постоянной капитальной застройки;

2. территория рабочего поселка занимает земли, расположенные вблизи водных русел Валуй и Оскол с понижающимся рельефом в юго-восточном направлении, участок не пересекает ж/д пути, и он имеет транспортные связи с центральной частью города Валуйки;

3. для планировки основной части поселка использован регулярно-геометрический принцип, для остальных частей более характерен свободно-ландшафтный композиционный прием, такая планировка во многом связана с характером рельефа участка, а также с организацией железнодорожных путей;

4. архитектурно-планировочные решения советского поселка Соцгородок, не вполне соответствуют выделенным принципам проектирования Милютин, однако, не все его зоны удалось подтвердить историческими или картографическими источниками;

5. состав зданий и сооружений бывшего рабочего поселка соответствовал требованиям социалистического расселения, многие промышленные и коммунальные здания сохранились, сейчас их оборудовали под другое назначение или они стали заброшенные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозова Е., Шиян О. Рабочий поселок – исчезающее градостроительное образование. URL: <https://bsa.by/news/BUA/rabochiy-poselok-ischezayuschee-gradostroitelnoe-obrazovanie?ysclid=lysnixzkzl134168018> (дата обращения 24.07.2024).

2. Новиков С.В., Николаева Е.А. Анализ зарубежного и отечественного опыта проектирования рабочих поселков // Вестник магистратуры, 2021. № 5-4 (116). С. 44–47.

3. Меерович М.Г. Советский рабочий поселок основной элемент государственной градостроительной политики 1921–1927 гг. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. №2. С. 4–8.

4. Куренной М.И. Планировка и застройка рабочих поселков. Москва: Стройиздат, 1956. 109 с.

5. Милютин Н.А. Соцгород: Проблема строительства социалистических городов: Основные вопросы рациональной планировки и строительства населенных мест СССР. Москва; Ленинград: Гос. изд-во, 1930. 83 с.

6. Мещеряков Н. О социалистических городах: [сборник статей]. Москва: Огиз: Молодая гвардия, 1931. 108 с.

7. Боровой, А.А. Планировка городов Московской области. Работы сектора планировки Московского областного проектного треста за 1925–1933 гг. М.: Госстройиздат, 1933. 224 с.

8. Меерович М.Г. Градостроительная политика в СССР (1917–1929). От города-сада к ведомственному рабочему поселку. 2-е Москва: Новое литературное обозрение, 2017. 346 с.

9. Меерович М.Г. Соцгород - базовое понятие советской градостроительной теории первых пятилеток // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 4. С. 51–56.

10. Меерович М.Г. От городов-садов к соцгородам: основные архитектурно-градостроительные концепции в СССР: 1917 - первая половина 1930-х гг.: автореферат диссертации, Москва, 2015. 46 с.

11. Samuelson L. The Industrial City As a Socialist Vision and Soviet Reality // Tankograd. 2011. Pp. 69–102. DOI:10.1057/9780230316669_3

12. Engel B. Plans and Patterns of Soviet Urbanism // The Concept of the Socialist City. 2022. Pp. 663–678. DOI: 10.7480/iph.s.2022.1.6516

13. Хазанова В.Э. Советская архитектура первой пятилетки. Проблемы города будущего. М., Наука, 1980. 374 с.

14. О работе по перестройке быта – Постановление ЦК ВКП (б) / КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК (1898-1986). Т. 5. 1929-1932. М.: Политиздат. 1984. 446 с., С. 118-119.

15. РГАСПИ Ф.17, Оп.113., Д. 851.232 л., Л. 122-122-об.

16. РГАСПИ Ф.17, Оп.113., Д. 861. 194 л., Л. 44-об-45

17. Дискуссия о соцрасселении. Новые материалы. Часть II. URL: <https://archi.ru/russia/45614/diskussiya-o-socrasselenii-novye-materialy-chastii?ysclid=lztvzxkaag914895798> (дата обращения 26.07.24).

18. Соцгородок (Валуйки). URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/%D0%A1%D0%BE%D1%86%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BA_\(%D0%92%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B9%D0%BA%D0%B8\)](https://ru.ruwiki.ru/wiki/%D0%A1%D0%BE%D1%86%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BA_(%D0%92%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B9%D0%BA%D0%B8)) (дата обращения 26.07.24).

19. Воспоминания жителей микрорайона «Соцгород» г. Валуйки о периоде 1941-1943 гг. URL:

<https://nsportal.ru/ap/library/drugoe/2014/10/16/vospominaniya-zhiteley-mikrorayona-sotsgorod-gvaluyki-o-periode-1941> (дата обращения 27.07.24).

20. Соцгородок. Зима. 24 декабря 1941 года. URL: <https://dimitry-kr.livejournal.com/16230.html?ysclid=lyuhqwwxyk617056336> (дата обращения 29.07.24).

21. Топографическая карта Валуйки. URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map-wpkrnx/%D0%92%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B9%D0%BA%D0%B8/?ysclid=lz4o28raky589266772¢er=50.17464%2C38.10737&zoom=14> (дата обращения 28.07.24).

22. Карта РККА М-37 (А). Курская, Белгородская, Воронежская и Харьковская области. 1941 г. URL: http://www.etomesto.ru/map-rkka_m-37-a/ (дата обращения 29.07.24).

23. Карта РККА юга России 1941 года, двухкилометровка. 1941 г. URL: http://www.etomesto.ru/map-rkka_ug/ (дата обращения 29.07.24).

24. Карта г. Валуйки, дома, улицы, организации – 2ГИС. URL: <https://2gis.ru/valuyki?m=38.123837%2C50.176588%2F16.03> (дата обращения 29.07.24).

25. Category: Valuyki. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Valuyki?use-lang=eo>

Информация об авторах

Арслан Марьям Ильхамовна, ассистент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Качемцева Любовь Владимировна, кандидат архитектуры, доцент кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: kachemtsevalubov@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 14.09.2024 г.

© Арслан М.И., Качемцева Л.В., 2025

**Arslan M.I., Kachemtseva L.V.*

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

**E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru*

URBAN PLANNING PECULIARITIES OF REALIZATION OF THE PRINCIPLES OF FORMATION OF SOVIET WORKING SETTLEMENTS ON THE TERRITORY OF BELGOROD REGION IN 1930 (ON THE EXAMPLE OF THE SOCIAL TOWN OF VALUIKI, BELGOROD REGION)

Abstract. The article is devoted to ideological and architectural-planning regularities of formation of working settlements of the period of Soviet industrialization in the 1930s. The peculiarity of the research lies in the study of these regularities on the example of the Social Town of the town of Valuyki, Belgorod region, on the territory of which there is a residential microdistrict. The relevance of the issue of formation and functioning of workers' settlements, as well as large social cities, is due to the fact that such formations are a unique urban phenomenon of the early XX century, they symbolize the rapid process of restructuring of the state apparatus in the formed USSR and demonstrate the results of the policy of industrialization of the country in the pre-war period. The problems of the Soviet experience of forming, maintaining and restoring workers' settlements are noted. The authors of the article consider the key principles of the organization of the management system of workers' settlements, highlight the techniques and recommendations for planning such urban planning objects, outline the order of zoning of the design and construction site, the nature of the buildings and structures to be erected on the specific example of the working settlement of Sotsgorodok, which was built in that period and retained its urban structure. Such a comprehensive analysis of the state policy of socialist settlement demonstrates its peculiarities both at the level of the concept and at the level of formation of the basic principles of urban planning. The peculiarities of the realization of the concept of formation of working settlements on the example of Sotsgorodok in Valuyki, Belgorod region. Valuyki, Belgorod region.

Keywords: socialist settlement, working settlement, socialist town, architectural and planning organization, urban planning principles.

REFERENCES

1. Morozova E., Shiyan O. Workers' settlement - disappearing urban formation [Rabochiy poselok - ischezayushchee gradostroitelnoy obrazovanie]. [Electronic resource]: URL: <https://bsa.by/news/BUA/rabochiy-poselok-ischezayushchee-gradostroitelnoe-obrazovanie?ysclid=lysnixzkzl134168018> (date of address 24.07.2024). (rus)
2. Novikov S.V., Nikolaeva E.A. Analysis of foreign and domestic experience of designing working settlements [Analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta proektirovaniya rabochikh poselkov]. Vestnik Magistracy. 2021. No. 5-4 (116). Pp. 44–47. (rus)
3. Meerovich M.G. Soviet working settlement as an element of the state urban policy 1921-1927 [Sovetsky rabochiy poselok osnovnoy element gosudarstvennoy gradostroitelnoy politiki 1927-1927]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. 2013. Vol. 13. No. 2. Pp. 4–8. (rus)
4. Kurenov M.I. Planning and development of working settlements [Planirovanie i zastroyka rabochikh poselkov]. Moscow: Stroyizdat. 1956. 109 p. (rus)
5. Milyutin N.A. Sotsgorod: Problem of construction of socialist cities: Basic issues of rational planning and construction of settlements of the USSR. [Sotsgorod: Problema stroitelstva sotsialisticheskikh gorodov: Osnovnye voprosy ratsionalnoy planirovki i stroitelstva naselennykh mest SSSR]. Moscow; Leningrad: Gos. izd vo. 1930. 83 p. (rus)
6. Meshcheryakov N. On socialist cities: [collection of articles] [O sotsialisticheskikh gorodakh: (sbornik statey)]. Moscow: Ogiz: Molodaya Gvardiya. 1931. 108 p. (rus)
7. Borovoy, A.A. Planning of the cities of the Moscow region. Works of the planning sector of the Moscow regional design trust for 1925-1933 [Planirovka gorodov Moskovskoy oblasti. Raboty sektora planirovki Moskovskogo oblastnogo proektnogo tresta za 1925-1933]. Moscow: Gosstroyizdat, 1933. 224 p. (rus)
8. Meerovich M.G. Urban Planning Policy in the USSR (1917-1929). From Garden City to Departmental Workers' Village [Gradostroitel'naya politika v SSSR (1917-1929). Ot goroda-sada k vedomstvennomu rabochemu poselku]. 2nd Moscow: New Literary Review. 2017. 346 p. ISBN 978-5-4448-0624-1 (rus)
9. Meerovich M.G. Sotsgorod - the basic concept of the Soviet urban planning theory of the first five years [Sotsgorod - bazovoe ponyatie sovetskoy gradostraitelnoy teorii pervykh pyatiletok]. Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2009. No. 4. Pp. 51–56. (rus)
10. Meerovich M.G. From garden cities to social cities: the main architectural and urban planning concepts in the USSR: 1917 - the first half of the 1930s: thesis abstract [Ot gorodov-sadov k sotsgorodam: osnovnye arkhitekturno-gradostroitelnye kontseptsii v SSSR: 1917 – pervaya polovina 1930: avtoreferat dissertatsii]. Moscow. 2015. 46 p. (rus)
11. Samuelson L. The Industrial City As a Socialist Vision and Soviet Reality. Tankograd, 2011. Pp. 69–102. DOI:10.1057/9780230316669_3
12. Barbara Engel, Plans and Patterns of Soviet Urbanism. The Concept of the Socialist City. 2022. Pp. 663–678. DOI: 10.7480/iph.2022.1.6516
13. Khazanova V.E. Soviet Architecture of the First Five-Year Plan. Problems of the city of the future [Sovetskaya arkhitektura pervoy pyatiletki. Problemy goroda budyshchego]. Moscow, Nauka. 1980. 374 p. (rus)
14. On the work on the restructuring of everyday life - Resolution of the Central Committee of the All-Union Communist Party of Bolsheviks (b) [O rabote po perestroyke byta -Postanovlenie TSK VKP (b) Moscow: Politizdat. 1984.]. CPSU in Resolutions and Decisions of Congresses, Conferences and Plenums of the Central Committee (1898-1986). T. 5. 1929-1932. Moscow: Politizdat. 1984.- 446 p., Pp. 118-119. (rus)
15. RGASPI F.17, Op.113, D. 851. 232 l., L. 122-122-ob.
16. RGASPI F.17, Op.113, D. 861. 194 l., L. 44-ob-45.
17. Discussion on social settlement. New materials. Part II [Diskusiya o sotssraselenii. Novye materialy. Chast II]. URL: <https://archi.ru/russia/45614/diskussiya-o-sotssraselenii-novye-materialy-chast-ii?ysclid=lztvzxkaag914895798> (date of address 26.07.24). (rus)
18. Sotsgorodok (Valuiki). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D1%86%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BA_\(%D0%92%D0%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B9%D0%BA%D0%B8\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D1%86%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BA_(%D0%92%D0%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B9%D0%BA%D0%B8)) (date of address 26.07.24).
19. Memories of inhabitants of the microdistrict «Sotsgorod» of Valuiki about the period 1941-1943. [Vospominaniya zhiteley mikrorayona «Sotsgorod» g. Valuiki o periode 1941-1943]. URL: <https://nsportal.ru/ap/library/drugoe/2014/10/16/vospominaniya-zhiteley-mikrorayona-sotsgorod-gvaluyki-o-period-1941> (date of address 27.07.24). (rus)
20. Sotsgorodok. Winter. December 24, 1941. URL: <https://dimitriy-kr.livejournal.com/16230.html?ysclid=lyuhqwwxyk617056336> (date of address 29.07.24).
21. Topographic map of Valuiki. URL: <https://ru-topographic-map.com/map-wpkrnx/%D0%92%D0%B0%D0%BB%D1%83%D>

0%B9%D0%BA%D0%B8/?ysclid=lz4o28raky589266772¢er=50.17464%2C38.10737&zoom=14 (date of address 28.07.24).

22.RKKA Map M-37 (A). Kursk, Belgorod, Voronezh and Kharkov regions.1941. URL: http://www.etomesto.ru/map-rkka_m-37-a/ (date of address 29.07.24).

23.Map of the Red Army of the South of Russia 1941, two-kilometer map. 1941 г. URL:

http://www.etomesto.ru/map-rkka_ug/ (date of address 29.07.24).

24.Map of Valuyki, houses, streets, organizations - 2GIS. URL: <https://2gis.ru/valuyki?m=38.123837%2C50.176588%2F16.03> (date of address 29.07.24).

25.Category:Valuyki. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Valuyki?use-lang=eo>

Information about the authors

Arslan, Maryam I. Assistant of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: maryam.rizaeva@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. V.G. Shukhov. 46, Kostyukova str., Belgorod, Russia, 308012.

Kachemtseva, Lyubov V. Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture and Urban Planning. E-mail: kachemtsevalubov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. V.G. Shukhov. 46, Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russia.

Received 14.09.2024

Для цитирования:

Арслан М.И., Качемцева Л.В. Градостроительные особенности реализации принципов формирования советских рабочих поселков на территории Белгородской области в 1930-х годах (на примере соцгорода г. Валуйки Белгородской области) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 60–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-60-72

For citation:

Arslan M.I., Kachemtseva L.V. Urban planning peculiarities of realization of the principles of formation of soviet working settlements on the territory of Belgorod region in 1930 (on the example of the social town of Valuiki, Belgorod Region). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 60–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-60-72

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-73-82

***Жданова И.В., Кузнецова А.А., Ненашева А.А.**
Самарский государственный технический университет
*E-mail: zdanovairina@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДЕТСКИХ БИБЛИОТЕК

Аннотация. Данное исследование актуализирует потребность внедрения новых способов перехода библиотек в открытую многофункциональную, культурно-коммуникационную систему для создания среды просвещения, коммуникации и самообразования. В настоящее время возникает потребность в формировании информационной среды, которая будет более привлекательной для современного человека, в том числе для детей. Вопрос реализации современных подходов к проектированию детских библиотек актуален, т.к. меняется представление о библиотечном пространстве – оно требует многофункциональности, адаптивности, востребованности для своей аудитории и должно отвечать мировым тенденциям. Авторами исследования выявлено влияние градостроительного размещения на обеспечение эффективности работы библиотеки; определены типы и подтипы размещения детских библиотек в структуре города; обобщен современный спектр услуг для детских медиатеки; сформулированы принципы адаптации к меняющимся потребностям общества, предложена функционально-технологическая схема и выявлены функциональные блоки с необходимыми зонами. А также разработана экспериментальная модель современной детской библиотеки в г. Самара. В результате, можно сделать вывод, что детская библиотека представляет собой уникальный тип библиотеки, ориентированный на детей и отличающийся по своим особенностям и целям от других типов библиотек.

Ключевые слова: детские библиотеки, медиатеки, медиаресурсы, функционально-технологическая схема, комфорт, доступность.

Введение. Новый этап исторического развития, который наступил в начале XXI века, сместил фокус внимания на получение информации и знаний [1]. Архитектура должна реагировать на сложившиеся перемены, поэтому особую актуальность получают исследования, которые отражают изменения в формировании объектов, связанных с обменом и получением информации и знаний. И тут особое внимание стоит уделить формированию зданий библиотек, которые на сегодняшний момент требуют существенных трансформаций [2–4]. Особое внимание стоит уделить детским библиотекам, так как именно они должны становиться не только хранилищем информации, но и насыщенным информационно-образовательным пространством с возможностью для детей творчески выражаться и получать новые знания [5–7]. Активное внедрение сверхтехнологий требует качественного и количественного пересмотра библиотечного пространства [8–9].

Так как детские библиотеки формируют новое поколение читателей, то для них должно становиться приоритетным в организации объекта его изменчивость, неоднородность, дифференциация, комфортность и мобильность пространства. Но в настоящее время детские библиотеки имеют не развитый функциональный состав, что приводит к потере внимания к данным объектам.

Библиотеки традиционно служат хранилищем знаний в бумажном формате, однако с раз-

витием цифровизации необходимо разрабатывать новые способы передачи и хранения информации. Детская библиотека, являясь в настоящее время частью информационного пространства, должна отражать современную мультимедийную среду, которая строится с учетом возрастных категорий пользователей, что, несомненно, обеспечит интерес к предоставляемой информации [10–11].

Проводимые исследования среди пользователей детских библиотек выявили желание видеть современный интерьер – 41 % респондентов, а также свободный доступ к книгам для их выбора. Опрос выявил необходимость в дополнительных пространствах: 35 % – зона «тишины»; 27,2 % – зона общения; 24,3 % – игровая зона; 22,4 % – техлаборатория; 13,6 % – зона блогинга (видеостудия) [9].

В настоящее время практически все общедоступные библиотеки России обслуживают детское население. По данным ГИВЦ на 1 января 2023 года количество публичных библиотек МК РФ составило 40906 единиц, в том числе 3230 детских специализированных библиотек. Но включение детских библиотек в централизованные библиотеки смешанного типа, привело к потере именно детского индивидуального пространства, а также отразилось на обслуживании данных помещений [12].

В Российской Федерации культура возведена в ранг национальных приоритетов. Федеральный проект в России «Культурная среда»

разработан на основе национального проекта «Культура». Основные цели и задачи – увеличение посещаемости учреждений культуры на 15%, увеличение количества обращений к цифровым ресурсам в сфере культуры в 5 раз. Ведущей программой Федерального проекта является создание модельных библиотек, которые стали настоящим прорывом. Также важным моментом является то, что библиотечная политика в интересах Детства на период до 2030 года реализует стратегию развития библиотечного дела в России, которая учитывает важность связи задач устойчивого развития государства с информационной и культурной деятельностью библиотек. Это предусматривает внедрение мер по цифровой трансформации библиотечной сети и созданию системы продвижения литературы в медиасфере [9, 13].

Все вышесказанное является актуальным и изменяет представление о библиотечном пространстве, способствуя увеличению интеллектуального потенциала городов за счет внедрения новых форм обслуживания посетителей [14–16]. Именно поэтому необходимо проводить больше исследований в этой области, разрабатывать решения по организации многофункциональной библиотечной системы, которая организует интеллектуальную среду для самообразования, коммуникаций и просвещения.

Цель данного исследования – выявление перспективных направлений и современных подходов архитектурно-планировочной организации детских библиотек с разработкой экспериментальной модели. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: выявить влияние градостроительного размещения на обеспечение эффективной работы детских библиотек; определить типы и подтипы размещения детских библиотек в городской структуре; обобщить современный спектр услуг для детских медиатек; выявить основные функционально-планировочные блоки детских библиотек; сформулировать принципы для способности адаптироваться к меняющимся потребностям и разработать экспериментальную модель современной детской библиотеки. Объект исследования – современная детская библиотека с новым форматом передачи и хранения информационных ресурсов. Предметом исследования стали архитектурно-типологические, технологические и градостроительные особенности формирования современного библиотечного пространства для детей.

Методика. Основными методами исследования стали комплексный анализ факторов, влияющих на архитектурно-планировочную организацию детских библиотек; систематизация

научно-теоретической базы и прикладных способов решения проблемы проектирования и строительства детских библиотек, а также графоаналитический анализ и моделирование.

Данное исследование опирается на научные труды в следующих областях: *исторические особенности развития библиотечного дела* (Б.Ф. Володин, И.В. Балкова, Т.Н. Коровянская, Э. Нуркулова и др.); *аспекты архитектурного проектирования зданий библиотек* (Л.З. Амлинский, В.М. Виноградов, Д. Гаврецкий, Ф.Н. Пащенко, Л.И. Алешин); *формирование мультимедийной среды библиотек* (И.А. Власенко, Н.Л. Голубева, Е.Г. Федюн, Л.М. Панчишко, Н.А. Стефановская, И.А. Климанова и др.).

Хотя многие отечественные и зарубежные исследователи занимаются изучением различных вопросов проектирования и строительства библиотек, многие аспекты нуждаются в корректировке в зависимости от современных требований.

Поэтому так важно развивать исследования в сфере детских библиотек, поддерживать национальный проект Культура на увеличение посещаемости и обращения к цифровым ресурсам. А для этого необходимо создавать адаптивные, многофункциональные объекты, ориентированные на определенную аудиторию и возрастную категорию, которые будут доступны для людей с ограниченными возможностями и отвечать мировым стандартам [17–19].

Основная часть. Современные детские библиотеки должны не только формировать информационное пространство, но и обеспечивать юным читателям комфорт и возможность для саморазвития, социализации и дисциплинированности.

Рассмотрим факторы, которые влияют на объемно-пространственную и архитектурно-планировочную организацию детских библиотек в структуре крупных городов.

1. Градостроительное размещение, при котором учитываются следующие показатели: *особенности и характеристики участка* (рельеф, наличие водоемов, геологические характеристики, климатические условия и экологические воздействия и прочее); *форма и вид окружающей застройки* (ближайшее архитектурное окружение, функциональное зонирование территории и т.п.); *структура и плотность населения* (социально-возрастной состав, плотность населения); *транспортная доступность* (наличие остановок общественного транспорта, парковок, развязок и др.); *допустимые технико-экономические показатели* (площадь, высотность, функциональное назначение и иные показатели). Все перечисленные показатели являются важными, так как они обеспечивают эффективность работы детской

библиотеки в городе и качество предоставляемых услуг.

Авторами исследования был проведен анализ размещения детских библиотек в структуре городской застройки разных регионов и выявлены следующие актуальные типы размещения: *встроенно-пристроенный тип, встроенный тип и отдельно стоящий*. Встроенно-пристроенные и встроенные модели детских библиотек, предполагающие размещение внутри уже существующих зданий – школ, детских садов, торговых центров, культурных центров или многофункциональных комплексов, имеют свои преимущества и недостатки. С одной стороны, это экономит средства на строительство и обеспечивает удобный доступ для определенной целевой аудитории. Но такая интеграция сопряжена с существенными ограничениями. Площадь, отведенная под библиотеку, оказывается ограниченной, что ограничивает возможности расширения и изменения ассортимента. Отдельно стоящий объект обладает гораздо большей гибкостью и потенциалом, открывает возможности для сотрудничества и может позволить создать уникальную архитектуру, адаптированную к потребностям детей. В результате более детального оценивания градостроительного размещения детских библиотек, выявленные типы можно поделить на несколько подтипов: встроенно-пристроенный делится на школьный и общедоступный; встроенный на школьный и общедоступный и отдельно стоящий может быть общедоступным [20].

2. Для того чтобы внедрить глобальные изменения в структуру детской библиотеки, необходимо проанализировать потребности и запросы детей-посетителей, изучить тренды и инновации, а также последние тенденции и библиотечной сфере и информационных технологиях. Обобщение полученной информации будет способствовать трансформации помещений и позволит расширить спектр услуг для детей [2, 5]. Выявлено, что именно детская медиатека отвечает последним современным тенденциям. Медиатека позволит предоставить следующие услуги: *цифровые ресурсы* для расширенного доступа к электронным изданиям в удобном формате; *аудиовизуальные материалы* и специальные пространства для просмотра и прослушивания; *интерактивные технологии*, позволяющие искать информацию детям и подросткам в привлекательной и интересной форме; *программы мастер-классов, лекций и культурных мероприятий* для обучения и развития. Безусловно, медиатека должна быть оснащена современным *техническим обеспечением* (компьютеры, планшеты, ноутбуки и другие электронные устройства), а также содержать

традиционный фонд, который необходимо эффективно интегрировать в современные медиа-теки.

Обобщив изученную информацию, требования СанПиН, ГОСТ и СП, а также логику взаимодействия групп помещений и блоков комплекса, можно предложить функционально-технологическую схему детской библиотеки и основные функциональные блоки (рис. 1): *входной блок* (зона вестибюля, гардеробная зона, информационная зона, зона санузлов, медпункт, зона охраны, многофункциональная атриумная зона); *развлекательный блок* (зона магазинов, зона отдыха и общения, зона санузлов); *административный блок* (кабинеты, переговорные, зона санузлов, зона отдыха); *блок хранения* (закрытый фонд, открытый фонд, кладовая, КУИ); *событийный блок* (выставочная зона, событийная площадка); *блок медиатеки* (зона индивидуальной работы, зона мастер-классов и групповой работы, зона работы за ноутбуками и стационарными компьютерами, переговорная, коворкинг, зона полиграфии и сервисных услуг); *технический блок* (зона служебных помещений, кабинет комплектования, зона технических помещений); *читальный блок* (зона книжных выставок, зона новинок литературы, зона периодических изданий, зона свободного чтения, зона абонемента, зона читального зала, зона редкого фонда, зона тишины); *парковый блок* (активная и тихая зона); *игровой блок* (детская игровая зона, взрослая игровая зона); *кафе* (помещения для посетителей, производственные помещения, помещения для приема и хранения продуктов, административно-бытовые помещения) и *паркинг* (зона парковки, охрана).

3. Для того чтобы соответствовать современным требованиям, детская библиотека должна отвечать потребностям своих посетителей и иметь возможность быстро адаптироваться к меняющимся условиям [8]. Чтобы удовлетворить этим условиям детская библиотека должна соответствовать определенным принципам, которые можно сформулировать так:

- *Маневренность*, при которой определенные пространства могут быстро менять свою конфигурацию в соответствии с текущими потребностями (использование сборно-разборной мебели и трансформируемые перегородки);

- *Приспосабливаемость*, используемые элементы могут быть многофункциональными и гибкими;

- *Временное использование*, которое может быть организовано следующим образом (рис. 2):

- режим работы по требованию (посещение после школы или в выходные);

- режим работы по записи (запись на определенный интервал времени);
- режим работы для групповых мероприятий и мастер-классов;

- режим работы с учетом возраста детей (доступ к информации для определенной возрастной группы);
- онлайн-режим (доступ к информационным, развивающим, развлекательным и образовательным материалам в онлайн-формате).

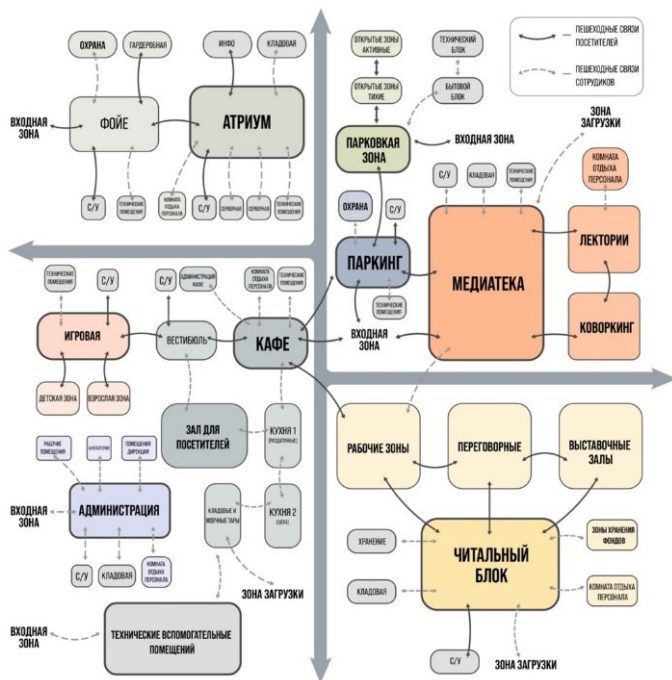


Рис. 1. Функционально-технологическая схема детской библиотеки

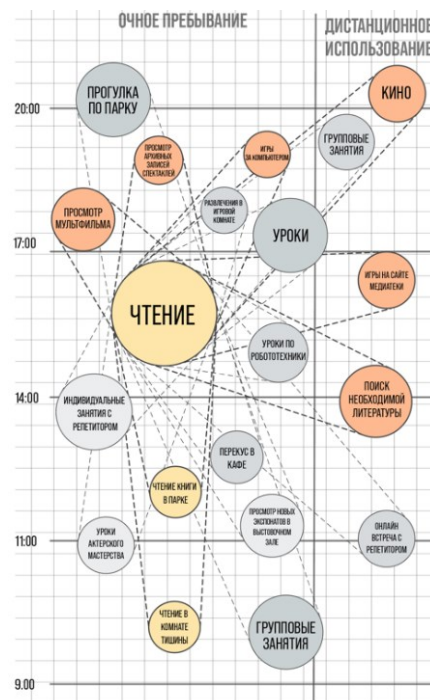


Рис. 2. Использование пространства детской библиотеки по времени

Учет выше изложенных факторов, влияющих на архитектурно-планировочную и объемно-пространственную организацию детских библиотек, позволит создать многофункциональную современную детскую библиотеку, которая будет отвечать потребностям юных пользователей и предложит востребованные пространства для обучения, общения и культурного просвещения.

Международный опыт проектирования детских библиотек вносит новые тенденции, которые основываются на создании динамичных пространств, способных адаптироваться к различным функциям одновременно, связи с игрой, а также внедрением новых технологий. Рассмотрим некоторые примеры подробно. Например, библиотека Чунцинского электроэнергетического колледжа (Китай, Тонг Нан, арх. Ган Вэй, 2023 г.) является пространственным ядром кампуса, который расположен на холмистом рельефе, благодаря чему здание имеет лентообразную форму. Сложный ландшафт позволяет использовать среду для обучения и развития мышления.

Приподнятый первый этаж здания, обращенный к ландшафтному водоему, образует пространство, защищенное от дождя и солнца, которое можно использовать для чтения, учебы и общения. Центральная лестница, расположенная в атриуме воплощает энергию между человеком и природой, циркуляции и связи между небом землей посредством науки (рис. 3).

В книжном доме (Китай, Пинтань, арх. Питер В. Ферретто, 2021 г.) стены преобразованы в матрицу книжных полок и окон, а внутреннее пространство – в место игры и чтения. Дом книги выполнен полностью из дерева. На фасаде – поликарбонатные панели, чтобы пропускать солнечный свет и смотреть наружу. Внутреннее пространство органично сформировано лестницей, которая не только является средством вертикальной коммуникации, но и пространством для игры и чтения, образуя общественные игровые «острова» на промежуточных площадках. Открытая проницаемая структура придает интерьеру непрерывность и гибкость (рис. 4).



Рис. 3. Библиотека Чунцинского электроэнергетического колледжа, Китай, Тонг Нан, арх. Ган Вэй, 2023 г.
[https://www.archdaily.com/1023695/library-of-chongqing-electric-power-college-gu-zhihong-studio-aatu?ad_medium=gallery]

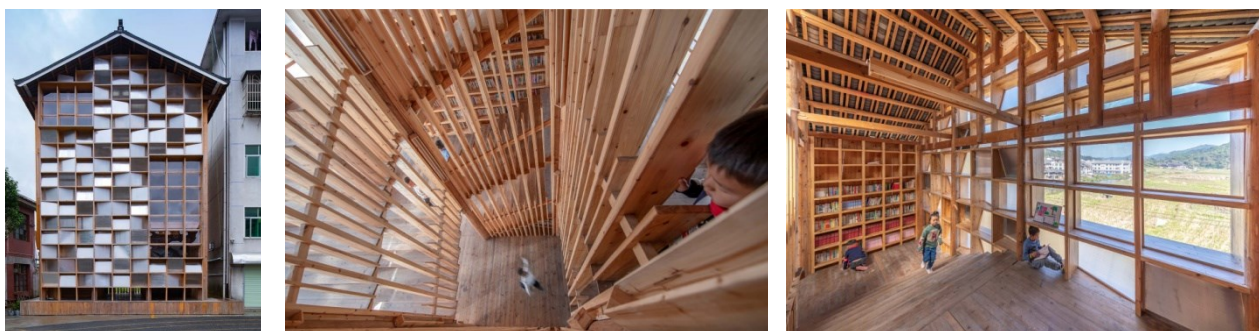


Рис. 4. Дом книги, Китай, Пинтань, арх. Питер В. Ферретто, 2021 г.
[https://www.archdaily.com/975470/pingtang-book-house-condition-lab-and-ual-studio?ad_medium=gallery]

В библиотеке Уинтропа (США, Уинтроп, арх. Рэй Джонстон, 2022 г.) экстерьер и интерьер отражают окружающую природную среду. Фасад представлен простой формой с широкими све-

сами крыш и видимыми конструкциями. Во внутреннее пространство также включены элементы естественного дизайна – скульптурное «дерево обучения» и камин в зале с большими окнами (рис. 5).



Рис. 5. библиотеке Уинтропа (США, Уинтроп, арх. Рэй Джонстон, 2022 г.)
[https://www.archdaily.com/994775/winthrop-library-johnston-architects?ad_medium=gallery]

Интерьер библиотеки филиала экспериментальной школы Хэби в Шанхайской консерватории музыки (Китай, Хэби, арх. Хуэй ВАНГ, 2023 г.) выполнен для разной возрастной группы по этажам. Предусматривает зоны для начальной школы на первом этаже, для средней школы на втором этаже, зона для учителей на третьем этаже. Выбор цвета обусловлен размерами пространств и возрастной группой школьников. Для больших пространств выбран белый цвет, чтобы подчеркнуть тихий характер библиотеки. Яркие цвета присутствуют на полу, мебели и книжных

полках. Для младших школьников интерьер выполнен в ярких цветах. Для маленьких читателей пространство разделено на более мелкие независимые зоны с помощью книжных полок. В результате образуется пространство, предназначенное для одной учебной группы. Также книжные полки прорезаны нишами разной формы, напоминающими «пещеры», что обеспечивает визуальную проницаемость между зонами. Зона средней школы представляет «острова» для чтения в нейтральных тонах с тематическим цветом. Стол-остров сложной формы служит учебной зоной, предназначенной для целого класса (рис. 6).

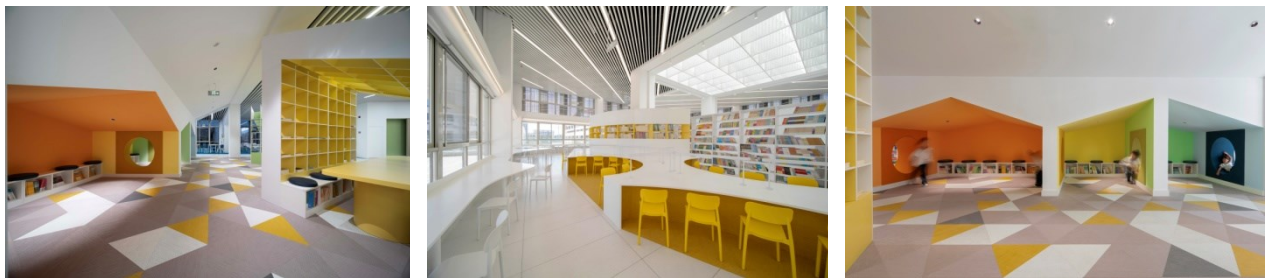


Рис. 6. Реновация интерьера библиотеки филиала экспериментальной школы Хэби в Шанхайской консерватории музыки, Китай Хэби, арх. арх. Хуэй ВАНГ, 2023 г. [https://www.archdaily.com/1011546/shanghai-conservatory-of-music-experimental-school-hebi-branch-library-interior-renovation-urbanus?ad_medium=gallery]

Обобщение передового международного опыта проектирования и строительства детских библиотек позволило выявить особенности, которые необходимо учитывать при формировании объемно-пространственной композиции детской библиотеки: *развитое благоустройство участка*, с местами для проведения мероприятий на свежем воздухе; *гармоничный и привлекательный объем здания*; *включение в пространство элементов естественного дизайна*, *использование цветовой гаммы*, характерной для определенного возраста детей, чтобы стимулировать активность и обучение.

В результате, основой объемно-планировочного решения детской библиотеки, является группировка помещений в соответствии с их функциональным назначением. Кроме того, здание, в котором главная целевая аудитория являются дети, должно способствовать созданию психологического и санитарно-гигиенического комфорта.

Разработанная в рамках исследования функционально-технологическая схема с выявленными основными функциональными блоками, а также рассмотренные факторы и сформулированные принципы для способности адаптации объекта к меняющимся потребностям прошли апробацию в экспериментальной модели детской библиотеки в г. Самара (рис. 7). Рассматривая градостроительное размещение участка под проектирование, обращаем внимание, что территория включена в транспортный каркас города, имеется связь с историческим центром города, в пешеходной доступности расположены остановки общественного транспорта (автобус, трамвай). Также в пешеходной доступности находятся образовательные организации (детский сад № 303, средняя общеобразовательная школа №92, Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева) и большая рекреационная зона (Ботанический сад). Пешеходная доступность с данными объектами будет способствовать притоку посетителей в проектируемую детскую библиотеку. На разра-

батываемой территории предполагается размещение отдельно стоящей общедоступной библиотеки максимальной вместимости 1500 человек. Функциональная схема детской библиотеки разработана с учетом СанНиП и предложенной в исследовании функционально-технологической схемы. Принципы маневренности и приспособляемости учтены в блоке медиатеки, читальном и событийном блоках для преобразования пространства под разные мероприятия. В решении детской библиотеки максимально используется естественный свет за счет ленточного остекления и атриума. Проектируемое здание детской библиотеки будет являться уникальным объектом и местом притяжения детей и подростков. Основные объемы облицованы белыми бетонными панелями с контрастными полосами.

Выводы. В итоге исследования можно сделать следующие выводы:

- В исследовании выявлены особенности градостроительного размещения, непосредственного окружения и самого участка, которые влияют на обеспечение эффективной работы библиотеки (природное окружение, градостроительная ситуация, структура населения, плотность населения, транспортная доступность, допустимые технико-экономические показатели).

- Определены 3 типа по способам градостроительного размещения: встроенно-пристроенный, встроенный и отдельно стоящий, а также несколько подтипов: встроенно-пристроенный школьный и общедоступный; встроенный школьный и общедоступный и отдельно стоящий может быть общедоступным.

- Исходя из существующих требований СанПиН, ГОСТ и СП, а также логики взаимодействия групп помещений и блоков, выявлены основные функционально-планировочные блоки (входной, развлекательный, административный, хранения, событийный, медиатека, технический, парковая, игровой, читальный, кафе, паркинг).

- В исследовании сформулированы основные принципы для способности адаптироваться к меняющимся потребностям: маневренность, приспособляемость, временное использование.

Предложенная в исследовании функционально-технологическая схема с выявленными основными функциональными блоками и сформулированными принципами апробированы в экспериментальной модели детской библиотеки в г. Самара.

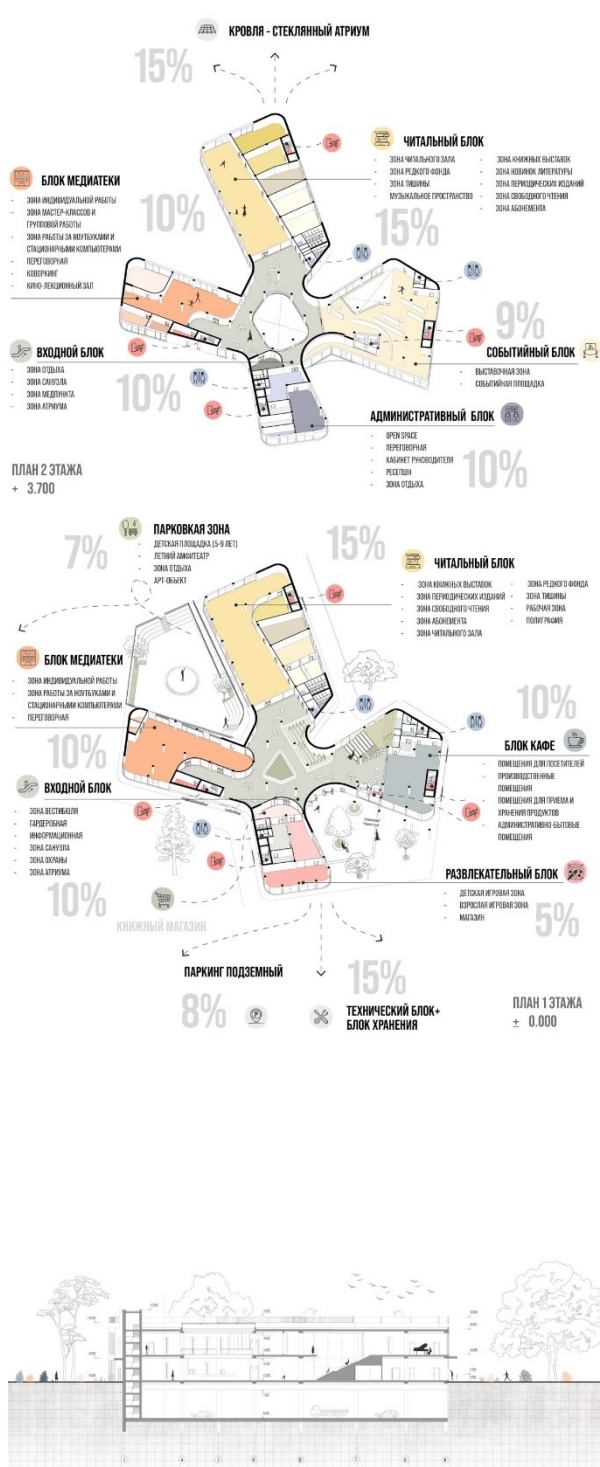


Рис. 7. Экспериментальная модель детской библиотеки в г. Самара, студентка каф. АЖОЗ СамГТУ Ненашева А.А., преподаватели: к.арх., доц. Кузнецова А.А., к.арх., доц. Жданова И.В.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власенко И.А. Технологии, меняющие мир образ будущего и детские библиотеки // Библиотечное дело. 2018. № 22 (328). С. 9–10.

Таким образом, детскую библиотеку необходимо рассматривать как отдельный тип, так как она сосредоточена на специфической аудитории, которые предъявляют определенные требования и запросы.

2. Туралина Н.А., Чесовская А.А. Детские библиотеки будущего // Наука. Культура. Искусство: актуальные проблемы теории и практики.

Сборник материалов Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. В 5-ти томах. Белгород, 2022. С. 225–231.

3. Голубева Н.Л., Федюн Е.Г., Панчишко Л.М. Формирование мультимедийной среды библиотеки, обслуживающей детей и подростков: информационнокоммуникационный подход // Мир науки, культуры, образования. 2021. № 3 (88). С. 170–172. DOI: 10.24412/1991-5497-2021-388-170-172

4. Davis Ju. The reflexive library leader: developing academic library leaders to meet modern library needs // Journal of Library Administration. 2023. Т. 63. № 7. С. 877–897.

5. Ермакова Е.Н. Детская библиотека – творческая лаборатория для проектной и исследовательской деятельности школьников // Вестник Тюменского государственного института культуры. 2021. № 1 (19). С. 140–143.

6. Lesneski T.E., Bray H. Redefining library as culture house: the Missoula public library partnership // ABI Technik. 2023. Т. 43. № 1. С. 13–28. DOI: 10.1515/abitech-2023-0003

7. Wang F. Research on library space construction and services under the background of smart library // International Journal of Social Sciences and Public Administration. 2024. Т. 3. № 1. С. 264–269. DOI: 10.62051/ijsspa.v3n1.38

8. Baryshev R.A., Verkhovets S.V., Babina O.I. The smart library project: development of information and library services for educational and scientific activity // The Electronic Library. 2018. Т. 36. № 3. С. 535–549. DOI: 10.1108/EL-01-2017-0017

9. Стефановская Н.А., Климанова И.А. Реальное и виртуальное пространство чтения в детской библиотеке // Homo legens в прошлом и настоящем. сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 218–220.

10. Плющ И.В. Детская библиотека как элемент структуры образовательной системы для несовершеннолетних // Приднепровский научный вестник. 2023. Т. 11. № 1. С. 176–178.

11. Сокольская Л.В. Родители как целевая аудитория репутационного менеджмента детских библиотек // Вестник культуры и искусств. 2020. № 3 (63). С. 25–35.

12. Кузнецова А.А., Иконописцева О.Г., Ненашева А.А. Историческая трансформация

библиотек // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство. Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции. Самара, 2022. С. 427–434.

13. Национальный проект Культура [Электронный ресурс] URL: Культура – Национальный проект «Культура» (xn--80aарамрерсчfmo7a3с9ehj.xn--plai) (дата обращения 10.10.2024)

14. Кузнецова А.А., Жданова И.В., Ненашева А.А. Поиск теоретических основ проектирования детских медиатек // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. 2022. Т. 24. № 84. С. 61–70. DOI: 10.37313/2413-9645-2022-24-84-61-70

15. Murliasari R. Strategy for improving library facilities and infrastructure in the development of modern library in pandemic era // Indonesian Journal of Librarianship. 2022. С. 99–112. DOI: 10.33701/ijolib.v2i2.2008

16. Igarashi T., Watanabe M., Tomita Yu., Sugeno Yu., Yamagishi M., Koizumi M. Public library events with spaces and collections: case analysis of the Helsinki central library OODI // Journal of Librarianship and Information Science. 2023. Т. 55. № 3. С. 681–693. DOI: 10.1177/09610006221097405

17. Ефимова С.Г., Меньшова С.В. Функциональная модель деятельности современной вузовской библиотеки (на примере библиотеки ННГАСУ) // Мир педагогики и психологии. 2020. № 5 (46). С. 6–11.

18. Белгородцева А.Г. Библиотека "PRO – ДВИЖЕНИЕ": концепция развития // Наука и образование: новое время. 2019. № 3 (32). С. 180–184.

19. Воскобойникова Е.А., Стручаева Т.М. Формирование читательской компетентности младших школьников на основе комплексного подхода // Начальная школа. 2019. № 6. С. 26–29.

20. Кузнецова А.А., Ненашева А.А. Особенности расположения детских библиотек в структуре крупного города // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство. Сборник статей 81-ой Всероссийской научно-технической конференции. Самара, 2024. С. 449–456.

Информация об авторах

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

Кузнецова Анна Андреевна, кандидат архитектуры, доцент кафедры Архитектуры жилых и общественных зданий. E-mail: amore_86@mail.ru. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Ненашева Анастасия Александровна, магистр архитектуры, соискатель ученой степени кандидата архитектуры. E-mail: anenasheva17@gmail.com. Самарский государственный технический университет. Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.

Поступила 19.01.2025 г.

© Жданова И.В., Кузнецова А.А., Ненашева А.А., 2025

***Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A., Nenasheva A.A.**

Samara State Technical University

*E-mail: zdanovairina@mail.ru

MODERN APPROACHES TO DESIGNING CHILDREN'S LIBRARIES

Abstract. This study actualizes the need to introduce new ways for libraries to transition into an open multifunctional, cultural and communication system to create an environment of education, communication and self-education. Currently, there is a need to create a new type of information space, more attractive for modern people, in particular for children. The issue of implementing modern approaches to the design of children's libraries is relevant, because The idea of library space is changing - it requires multifunctionality, adaptability, relevance for its audience and must meet global trends. The authors of the study identified the influence of urban planning on ensuring the efficiency of the library; the types and subtypes of placement of children's libraries in the city structure are determined; summarizes the modern range of services for children's media libraries; principles of adaptation to the changing needs of society are formulated, functional blocks are identified. An experimental model of a modern children's library in Samara has also been developed. As a result, it can be concluded that the children's library should be considered as a separate type among existing libraries, since it focuses on a specific audience - children and has certain characteristics and goals that distinguish it from other types of libraries.

Keywords: children's libraries, media libraries, media resources, functional and technological scheme, comfort, accessibility.

REFERENCES

1. Vlasenko I.A. Technologies that change the world, the image of the future and children's libraries [Tekhnologii, menyayushchie mir obraz budushchego i detskie biblioteki]. Librarianship. 2018. No. 22(328). Pp. 9–10. (rus)
2. Turanina N.A., Chesovskaya A.A. Children's libraries of the future [Detskie biblioteki budushchego]. Science. Culture. Art: current problems of theory and practice. Collection of materials from the All-Russian (with international participation) scientific and practical conference. In 5 volumes. Belgorod. 2022. Pp. 225–231. (rus)
3. Golubeva N.L., Fedyun E.G., Panchishko L.M. Formation of a multimedia library environment serving children and adolescents: information and communication approach [Formirovanie mul'timedijnoj sredy biblioteki, obsluzhivayushchej detej i podrostkov: informacionnookommunikacionnyj podhod]. World of science, culture, education. 2021. No 3 (88). Pp. 170–172. DOI: 10.24412/1991-5497-2021-388-170-172 (rus)
4. Davis Ju. The reflexive library leader: developing academic library leaders to meet modern library needs: Journal of Library Administration. 2023. Vol. 63. No. 7. Pp. 877–897.
5. Ermakova E.N. Children's library - a creative laboratory for project and research activities of schoolchildren [Detskaya biblioteka - tvorcheskaya laboratoriya dlya proektnoj i issledovatel'skoj deyatel'nosti shkol'nikov]. Bulletin of the Tyumen State Institute of Culture. 2021. No. 1 (19). Pp. 140–143. (rus)
6. Lesneski T.E., Bray H. Redefining library as culture house: the Missoula public library partnership: ABI Technik. 2023. Vol. 43. No. 1. Pp. 13–28. DOI: 10.1515/abitech-2023-0003
7. Wang F. Research on library space construction and services under the background of smart library: International Journal of Social Sciences and Public Administration. 2024. Vol. 3. No. 1. Pp. 264–269. DOI: 10.62051/ijsspa.v3n1.38
8. Baryshev R.A., Verkhovets S.V., Babina O.I. The smart library project: development of information and library services for educational and scientific activity: The Electronic Library. 2018. Vol. 36. No. 3. Pp. 535–549. DOI: 10.1108/EL-01-2017-0017
9. Stefanovskaya N.A., Klimanova I.A. Real and virtual reading space in a children's library [Real'noe i virtual'noe prostranstvo chteniya v detskoj biblioteke]. Homo legens in the past and present. collection of materials of the IV International Scientific and Practical Conference. Ekaterinburg. 2023. Pp. 218–220. (rus)
10. Plyushch I.V. Children's library as an element of the structure of the educational system for

minors [Detskaya biblioteka kak element struktury obrazovatel'noj sistemy dlya nesovershennoletnih]. Pridneprovsky Scientific Bulletin. 2023. Vol. 11. No. 1. Pp. 176–178. (rus)

11. Sokolskaya L.V. Parents as the target audience of reputation management for children's libraries [Roditeli kak celevaya auditoriya reputacionnogo menedzhmenta detskih bibliotek]. Bulletin of Culture and Arts. 2020. No. 3 (63). Pp. 25–35. (rus)

12. Kuznetsova A.A., Ikonopistseva O.G., Nenasheva A.A. Historical transformation of libraries [Istoricheskaya transformatsiya bibliotek]. Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and urban planning. collection of articles of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference. Samara. 2022. Pp. 427–434. (rus)

13. National Culture Project [Nacional'nyj proekt Kul'tura]. URL: (xn--80aapam-pemchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai) (date of treatment: 10.10.2024)

14. Kuznetsova A.A., Zhdanova I.V., Nenasheva A.A. Search for theoretical foundations for designing children's media libraries [Poisk teoreticheskikh osnov proektirovaniya detskih mediatek]. News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social, humanities, medical and biological sciences. 2022. Vol. 24. No 84. Pp. 61–70. DOI: 10.37313/2413-9645-2022-24-84-61-70 (rus)

15. Murliasari R. Strategy for improving library facilities and infrastructure in the development of modern library in pandemic era: Indonesian Journal of Librarianship. 2022. Pp. 99–112. DOI: 10.33701/ijolib.v2i2.2008

Information about the author

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

Kuznetsova, Anna A., PhD, Assistant professor. E-mail: zdanovairina@mail.ru. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Nenasheva, Anastasia A., Master of Architecture, candidate for the degree of candidate of architecture. E-mail: anenasheva17@gmail.com. Samara State Technical University. Russia, 443100, Samara, str. Molodogvardeiskaya, 244.

Received 19.01.2025 г.

Для цитирования:

Жданова И.В., Кузнецова А.А., Ненасшева А.А. Современные подходы к проектированию детских библиотек // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 73–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17

For citation:

Zhdanova I.V., Kuznetsova A.A., Nenasheva A.A. Modern approaches to designing children's libraries. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 73–82. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-73-82

16. Igarashi T., Watanabe M., Tomita Yu., Sugeno Yu., Yamagishi M., Koizumi M. Public library events with spaces and collections: case analysis of the Helsinki central library OODI: Journal of Librarianship and Information Science. 2023. Vol. 55. No. 3. Pp. 681–693. DOI: 10.1177/09610006221097405

17. Efimova S.G., Menshova S.V. Functional model of the activities of a modern university library (using the example of the NNGASU library) [Funkcional'naya model' deyatel'nosti sovremennoj vuzovskoj biblioteki (na primere biblioteki NNGASU)]. The world of pedagogy and psychology. 2020. No. 5 (46). Pp. 6–11. (rus)

18. Belogorodtseva A.G. Library "PRO – MOVEMENT": development concept [Biblioteka "PRO - DVIZHENIE": koncepciya razvitiya]. Science and education: new times. 2019. No. 3 (32). Pp. 180–184. (rus)

19. Voskoboinikova E.A., Struchaeva T.M. // Formation of reading competence of junior school-children based on an integrated approach [Formirovanie chitatel'skoj kompetentnosti mladshih shkol'nikov na osnove kompleksnogo podhoda]. Primary school. 2019. No. 6. Pp. 26–29 (rus)

20. Kuznetsova A.A., Nenasheva A.A. Features of the location of children's libraries in the structure of a large city [Osobennosti raspolozheniya detskih bibliotek v strukture krupnogo goroda]. Traditions and innovations in construction and architecture. Architecture and urban planning. Collection of articles of the 81st All-Russian Scientific and Technical Conference. Samara, 2024. Pp. 449–456. (rus)

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91

*Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: t.goloviznina@mail.ru

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. Полученные данные демонстрируют зависимость частоты и амплитуды колебаний предела прочности на сжатие цементного камня от гранулометрического состава цемента. С помощью электронной микроскопии установлено, что новообразования в цементном камне из модельного грубофракционного цемента сложнее срастаются в монолитный конгломерат. Цементный камень из преимущественно грубомолотого цемента по сравнению с камнем из тонкомолотого цемента медленно набирает прочность, но колебания прочностных характеристик происходят с меньшей частотой и амплитудой, при длительном твердении значения прочностных показателей после спада восстанавливаются и увеличиваются. Сравнительным рентгенофазовым анализом подтверждена повышенная скорость гидратационного взаимодействия тонких фракций цемента с образованием мелкокристаллических структур, склонных к перекристаллизации. В результате перекристаллизации, цементный камень из тонкомолотых цементов склонен к циклическим снижениям предела прочности на сжатие без полного восстановления ранних максимальных показателей. В соответствии с полученными данными, для компенсации спадов, восстановления и увеличения прочностных характеристик цементного камня в отдалённые сроки твердения, необходимо комплексное наличие крупных (более 50 мкм), средних (30 до 50 мкм) и мелких фракций в составе цемента.

Ключевые слова: портландцемент, цементный камень, гранулометрический состав, гидратация, структурообразование, колебания прочностных характеристик.

Введение. На строительно-технические свойства цементного камня оказывают влияние все технологические переделы производства [1–5]. Производители цемента, в соответствии с требованиями ГОСТ 31108, определяют и контролируют качество продукции в возрасте до 28 суток твердения. Этим временным промежутком определения свойств и характеристик ограничивается и большая часть исследовательских работ [6–10]. Процессы, происходящие в камне на основе цемента, не завершаются через месяц твердения. Сложная микроструктура камня продолжает меняться все время существования изделия [11, 12]. Процессы, происходящие в цементном камне при длительном твердении, влияют на область их использования потребителями. Свойства цементного камня зависят, в том числе, и от гранулометрического состава вяжущего материала [13–15]. Современное оборудование позволяет регулировать тонкость помола цемента с достаточной точностью, соответственно производитель получает средство управления свойствами продукции. Использование гранулометрического состава цемента как фактора воздействия на качество, будет положительным лишь при условии знания

динамики процесса долговременного твердения. Регулирование свойств цементного камня и предотвращения возможных отрицательных явлений – задача необходимая.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием портландцементного клинкера. В качестве добавки к клинкеру применен природный гипсовый камень. Анализ гранулометрического состава цементов проведен на лазерном анализаторе размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus. Фазовый состав цемента и продуктов гидратации установлен методом рентгеновской дифракции. Микроструктура цементного камня исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 TESCAN. Предел прочности на сжатие определен у цементного камня в малых образцах, изготовленных из цементного теста с единым водоцементным отношением.

Получение цементов. Химический состав использованных для исследования промышленного портландцементного клинкера и природного гипсового камня представлен в таблице 1; расчётный фазовый состав и модульные характеристики клинкера – в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав клинкера и природного гипсового камня, масс %

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	п.п.п.
Клинкер	21,72	5,26	4,05	66,56	0,75	0,72	0,75	0,18
Гипсовый камень	0,49	0,02	0,03	32,80	0,47	46,65	–	19,55

Таблица 2

Модульные характеристики клинкера и фазовый состав, масс %

КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
0,93	2,33	1,3	64,77	13,41	7,09	12,32

На рисунке 1 представлен фрагмент дифрактограммы промышленного клинкера.

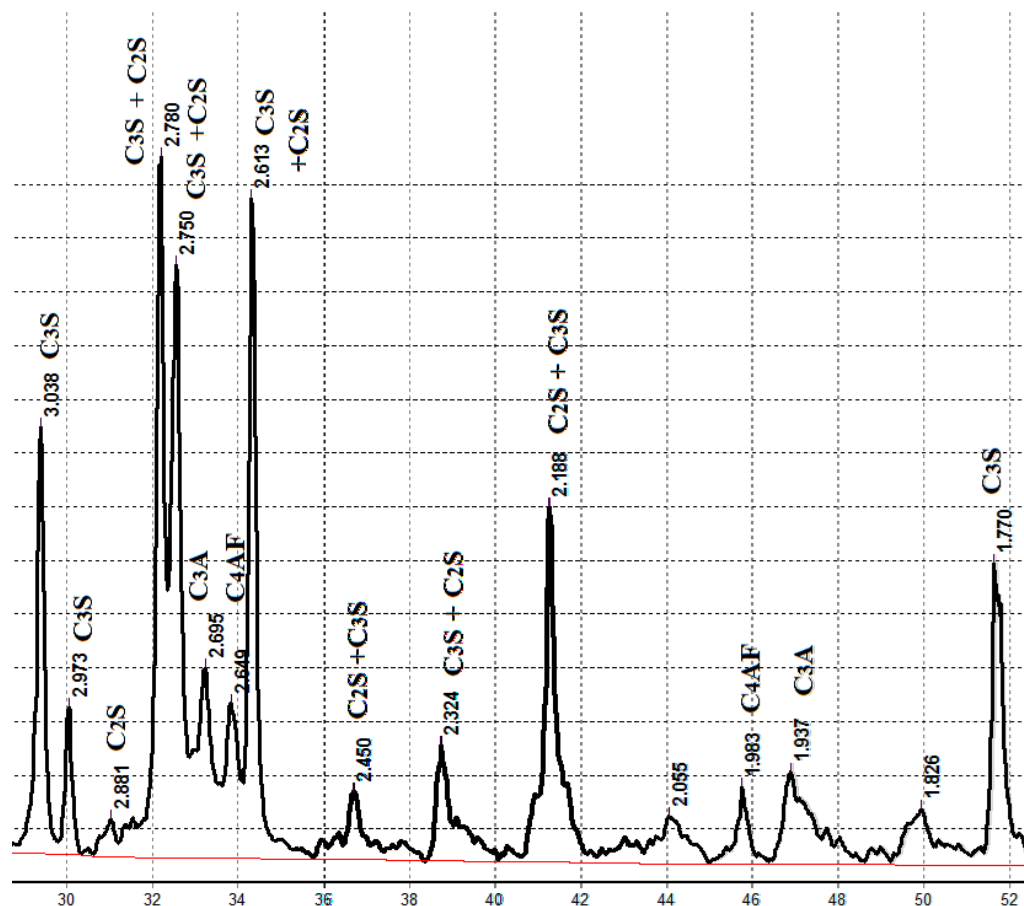


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы промышленного клинкера

По данным рентгенофазового анализа (рис.1) в составе использованного промышленного клинкера идентифицированы четыре основные клинкерные фазы: алит (C₃S) – d = 1,770; 3,038; 2,780; 2,973; 2,750; 2,613; 2,188 Å; белит (C₂S) – d = 2,881; 2,780; 2,750; 2,613 Å, 2,188 Å; C₃A – d = 2,695; 1,983 Å; C₄AF – d = 1,937; 2,649 Å. Таким образом (табл. 1, 2, рис.1), выбранный для исследования материал является типичным представителем рядового портландцементного клинкера.

Для вяжущих порошков частицы принято делить по крупности на: очень мелкие 0,1–5 мкм; мелкие 5–30; средние 30–50 и крупные – свыше 50 мкм. К исследованию приняты экспериментальные модельные цементы, преимущественно представленные тонкой и грубой фракциями. Текущий контроль помола вели по удельной поверхности. Усреднённый по составу клинкер привели в два состояния: грубого (250 м²/кг) и тонкого (550 м²/кг) помола, сохраняя состав

усреднённой пробы клинкера, не отбрасывая и не добавляя материал при измельчении и помоле. Гистограммы распределения частиц клинкера по крупности представлены на рисунке 2, содержание частиц различной крупности в составе грубофракционного и тонкофракционного клинкеров – в таблице 3.

По данным лазерного гранулометрического анализа, основная масса частиц грубофракционного клинкера представлена размером от 40 до 90 мкм, с содержанием частиц средней фракции порядка 20 %. Тонкофракционный клинкер преимущественно состоит из частиц мелкой фракции размером до 16 мкм, с содержанием частиц средней фракции не более 4 %.

Для получения цемента в каждый вид клинкера добавлено 5 % измельчённого до полного прохождения через сито №008 природного гипсового камня. Усреднение цементов проведено без влияния на фракционный состав.

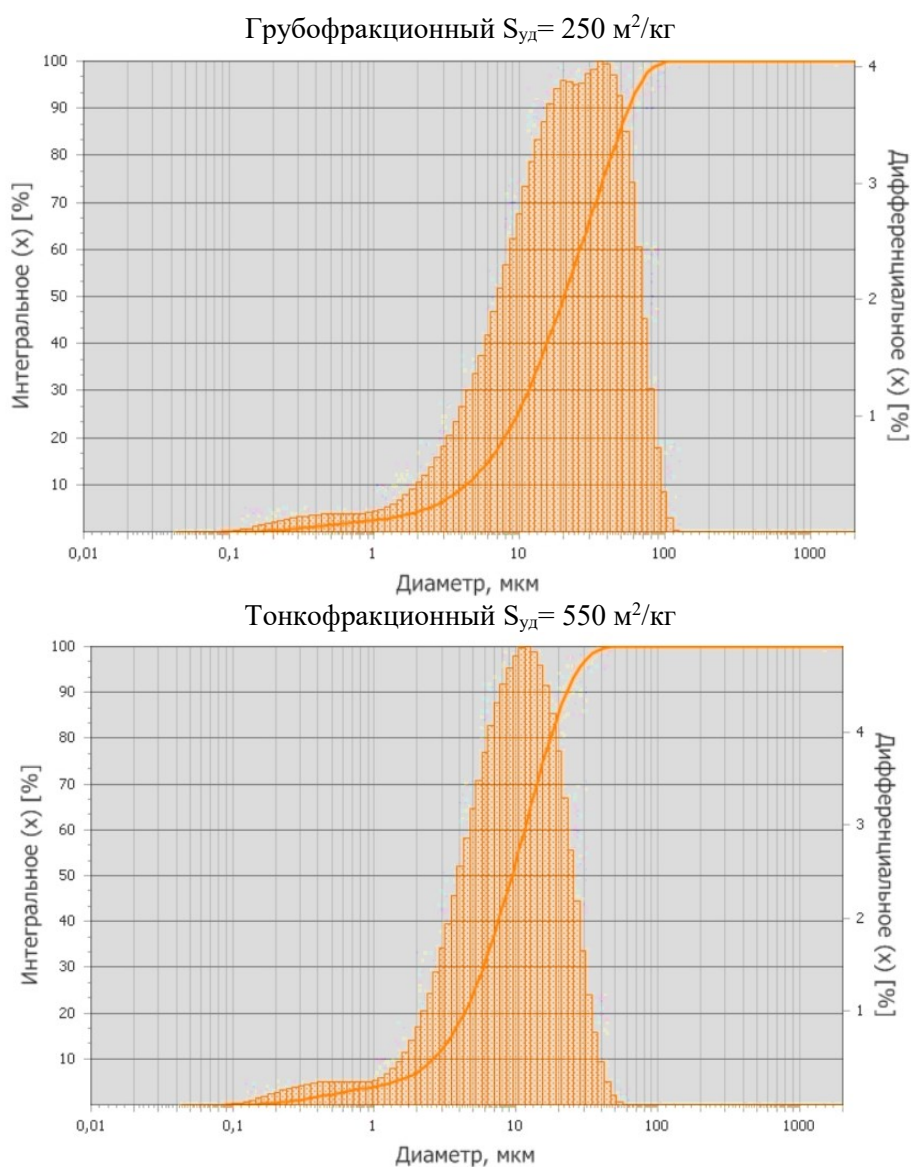


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц молотого клинкера по крупности.

Таблица 3

Распределение частиц клинкера по диаметру, %

Персентиль, %	Диаметр, мкм	
	грубофракционный	тонкофракционный
5	2,32	1,38
10	4,31	2,62
25	9,64	5,08
50	20,08	9,32
75	37,8	15,57
90	56,01	22,65
95	66,88	27,47
99	86,31	37,14

Основная часть. Влияние гранулометрического состава на прочностные характеристики цементного камня в ранние и длительные сроки твердения определено в трёх видах цемента: № 1 – из клинкера грубофракционного состава; № 2 –

из клинкера тонкофракционного состава; № 3 – смеси 1:1 тонко- и грубофракционных составов.

Образцы цементного камня формовали и хранили в идентичных условиях. Влияние гранулометрического состава на прочностные характеристики, фазовый состав и структуру цементного

камня определяли в возрасте от 2 суток до 7 месяцев твердения.

Данные сравнительного рентгенофазового анализа продуктов гидратации исследуемых цементов в возрасте 7 суток твердения (рис. 3а) демонстрируют и подтверждают известный факт – чем тоньше помол, тем интенсивнее идут реакции гидратации. В камне из цемента тонкофракционного состава интенсивности пиков основной клинкерной фазы – C_3S , значительно ниже, а скорость образования первичного продукта гидратации $Ca(OH)_2$ – выше. Тенденция относительно повышенной скорости реакций образования про-

дуктов гидратации в камне из тонкофракционного вяжущего сохраняется на всем протяжении эксперимента. На рисунке 3б представлен фрагмент сравнительной дифрактограммы цементного камня в возрасте пяти месяцев твердения. Интенсивность дифракционных максимумов, принадлежащих гидратным образованиям: тобермориту $C_5S_6H_5$ – $d=3,07; 2,97; 2,8 \text{ \AA}$ и смеси высокоосновных и низкоосновных гидросиликатов $C-S-H$ – $d=3,11; 3,04; 2,88 \text{ \AA}$, убывают в последовательности: камень из тонкофракционного цемента → камень из смеси 1:1 → камень из грубофракционного цемента.

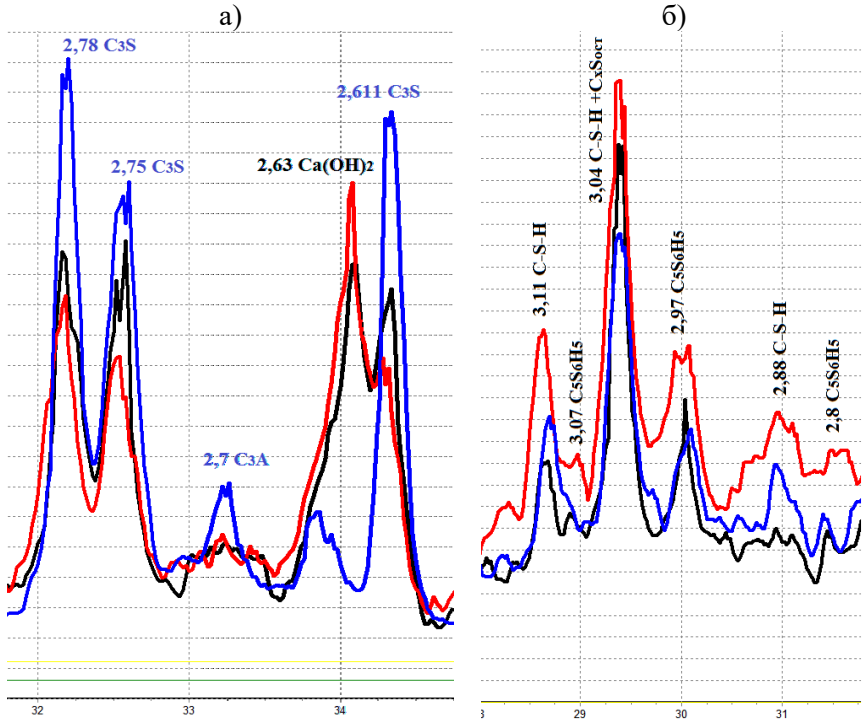


Рис. 3. Фрагменты сравнительного рентгенофазового анализа.

- а) — исходного клинкера и продуктов гидратации в возрасте 7 суток твердения камней из цемента:
—грубофракционного; — тонкофракционного.
- б) продуктов гидратации в возрасте 5 месяцев твердения камней из цемента:
— грубофракционного; — тонкофракционного; — смеси 1:1

По данным рентгенофазового анализа (рис. 3б), преимущество в скорости образования гидратных кристаллических фаз сохраняется за камнем из тонкофракционного цемента и при длительном времени твердения – интенсивность ди-

фракционных максимумов гидратных новообразований выше у камня из тонкофракционного цемента (рис. 3б, красная линия). Сопоставив значения полуширины дифракционных максимумов гидратных новообразований (таблица 4), можно судить о степени кристаллизации.

Таблица 4

Влияние гранулометрического состава цемента на характер кристаллизации продуктов гидратации

Продукт гидратации	Межплоскостное расстояние, d Å	Полуширина дифракционных максимумов, ½ h		
		гранулометрический состав цемента		
		грубофракционный	тонкофракционный	смесь 1:1
C-S-H	3,11	0,24	0,39	0,29
	3,04	0,15	0,29	0,21
	2,88	0,45	0,56	0,49
C ₅ S ₆ H ₅	2,97	0,35	0,63	0,37
	2,8	0,23	0,35	0,29

Чем выше значение полуширины дифракционного максимума (чем шире пик и волнистее линия дифрактограммы), тем мельче и дефектнее кристаллы фазы и дальше кристаллическая структура от параметров идеальной кристаллической решетки. При высокой скорости гидратации тонких фракций цемента образуются неустойчивые мелкокристаллические структуры, склонные к перекристаллизации. На дифрактограмме максимумы фаз мелкой нестабильной кристаллизации выглядят более широкими, менее четкими и менее острыми (рис. 3б, красная линия). Таким образом, рентгенофазовый анализ степени кристаллизации продуктов гидратации подтверждает, что высокая скорость образования кри-

сталлогидратов приводит к формированию неустойчивых мелкокристаллических структур цементного камня.

Влияние гранулометрического состава цемента на прочностные характеристики цементного камня определено в малых образцах из цементного теста. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Установлено, что цементный камень из исследованных составов в процессе твердения подвержен циклическому спаду-набору прочности. Колебания показателей предела прочности на сжатие цементного камня являются закономерным процессом механизма твердения и обусловлены перекристаллизацией новообразований из мелкокристаллических в устойчивые структуры [12, 13].

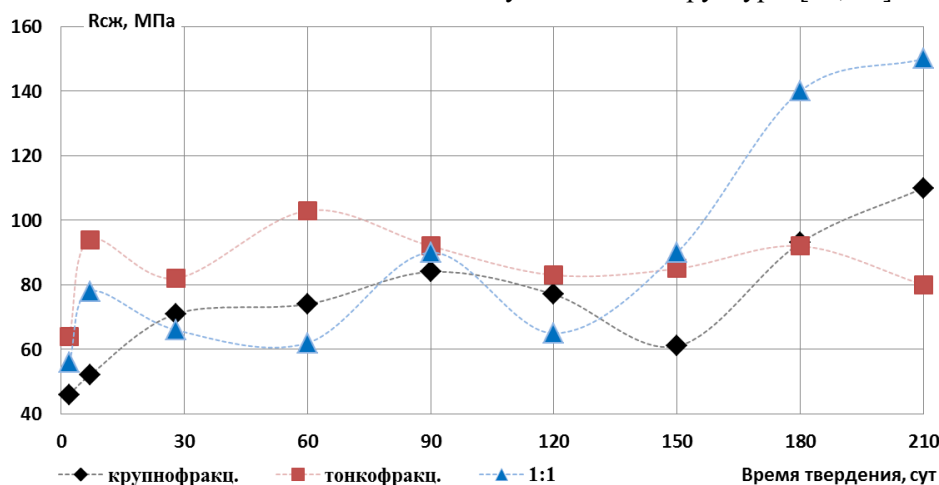


Рис. 4. Влияние гранулометрического состава цемента на прочностные характеристики цементного камня

Анализ колебания прочностных характеристик цементного камня проведён по результатам семи месяцев твердения. По полученным данным установлено, что цементный камень из крупнофракционного цемента демонстрирует минимальные значения прочностных показателей в начальные сроки твердения, стабильный рост прочности до трёх месяцев твердения. Затем два месяца показатели прочности снижаются. За следующий шестой месяц твердения прочность восстанавливается и превосходит ранее достигнутые максимальные значения. Далее набор прочности продолжается.

Цементный камень из тонкофракционного цемента демонстрирует максимальные показатели прочности до 60 суток твердения, затем резкое на 30% и длительное, в течение двух месяцев падение прочности. С четырёх до шести месяцев твердения прочность незначительно увеличивается. В промежутке от шести до семи месяцев твердения наблюдается третий период спада. Максимальные показатели прочности, достигнутые в возрасте двух месяцев твердения, до 7 месяцев твердения не восстанавливаются. Камень

из тонкофракционного цемента характеризуется высокими частотой и амплитудой спада прочности.

У камня из смеси тонкофракционного и грубофракционного цементов характер графика изменения прочности до 28 суток твердения полностью повторяет характер твердения камня из тонкофракционного цемента. Спады прочности также цикличны, но абсолютные показатели прочности после каждого спада восстанавливаются со значительным приростом. К семи месяцам твердения камень из смеси фракций демонстрирует максимальные прочностные показатели.

Сравнительный анализ колебаний прочностных характеристик позволяет предположить, что чем ближе гранулометрический состав к монофракционному и чем выше при этом дисперсность частиц цемента, тем вероятнее долговременный, опасный для конструкций, спад прочностных характеристик цементного камня.

Влияния гранулометрического состава цемента на микроструктуру цементного камня

установлено сравнением микрофотографий поверхности цементного камня в возрасте 5 месяцев твердения. На микрофотографиях поверхностей (рисунок 5) просматриваются слоистые кри-

сталлы гидросиликатов кальция, игольчатые кристаллы AFm-фазы (гидраты C_3A и C_4AF), аморфизированные структуры, характерные для гидросиликатов кальция и светлые слабоструктурированные включения портландита.

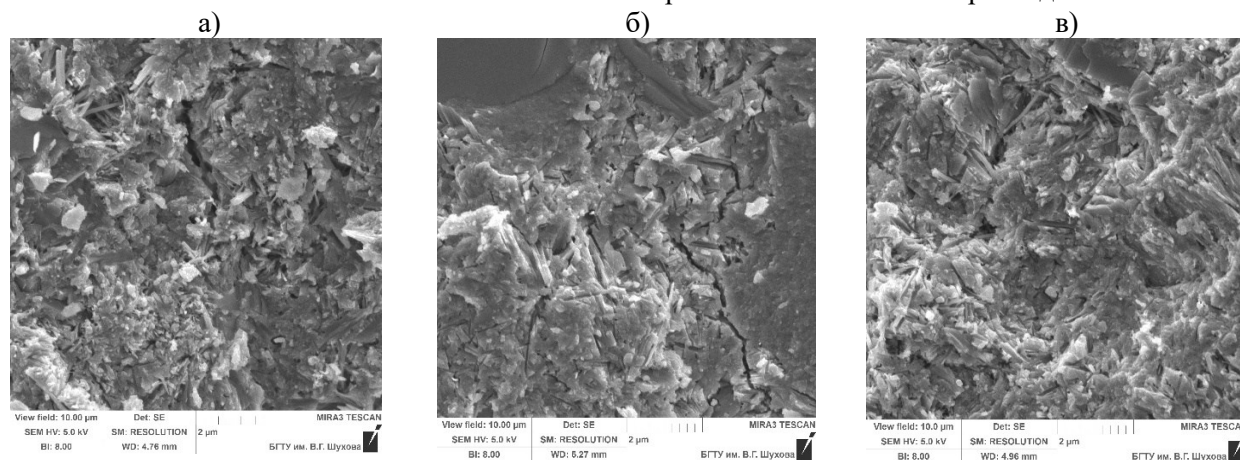


Рис. 5. Микроструктура цементного камня в возрасте 5 месяцев твердения; из цемента: а) крупнофракционного; б) тонкофракционного; в) смеси 1:1

Микроструктурным анализом установлено, что в камне из грубофракционного цемента (рис. 5а) имеются пустоты (условно замкнутые поры) длиной до 30 мкм и шириной до 3 мкм. Пустоты проходят по границам кристаллических фаз. Такое расположение характерно для несросшихся в единый конгломерат крупнокристаллических новообразований. Можно предположить, что причиной является относительно медленная гидратация преимущественно крупных частиц цемента, а, соответственно, и медленный рост кристаллоновообразований и затруднения с организацией единого, плотного каркаса камня из-за ограниченного количества точек-контактов крупных кристаллогидратов.

В камне из мелкофракционного цемента (рис. 5б) зафиксированы протяжённые микротрещины (капилляры) шириной до 1,2 мкм и длиной до 50 мкм. Микротрещины проходят через кристаллы гидратных новообразований, раскалывая уже сформировавшуюся структуру камня. Вероятно, микротрещины являются результатом внутренних напряжений, следствием процесса перекристаллизации новообразований, который сопровождается быстрым ростом мелкокристаллических структур при высокой скорости гидратации.

В камне из смеси тонкофракционного и грубофракционного цемента (рис. 5в) зафиксированы пустоты и микротрещины, но оба деструктивных формирования выражены гораздо слабее, чем в камне из только грубой и только мелкой фракций цемента. Размер пустот не более 3 мкм, а длина редких микротрещин до 15 мкм.

Выводы. Установлено, что цементный камень из исследованных модельных составов в процессе твердения подвержен циклическому

спаду-набору прочности. На амплитуду и частоту циклов в существенной мере влияет гранулометрический состав цемента.

Сравнительный рентгенофазовый анализ продуктов гидратации демонстрирует, что тонкий помол способствует увеличению скорости образования кристаллогидратов, который обеспечивает высокие прочностные показатели цементного камня до двух месяцев твердения. Ускоренный рост мелких кристаллических новообразований приводит к формированию неустойчивых структур и к их закономерной перекристаллизации. Следствием одновременной перекристаллизации камня из цемента преимущественно мелкой фракции является нарушение целостности кристаллических структур до образования протяжённых микротрещин-капилляров. Процессы одновременной перекристаллизации приводят к значительным спадам прочности.

В отдалённые сроки твердения наибольшее опасение вызывает спад прочности камня из тонкомолотого цемента. Продемонстрировав максимальную прочность к двум месяцам твердения, камень её теряет и не восстанавливает показатели до 7 месяцев.

Грубомолотые цементы при пониженных абсолютных показателях прочности в ранние сроки твердения образуют стабильные структуры, обладающие потенциалом увеличения предела прочности на сжатие в отдалённые сроки. Крупная фракция в составе цемента обеспечивает максимальный период (плавный спад) колебаний. С помощью микроструктурного анализа установлено, что при гидратации цемента преимуще-

ственно крупной фракции новообразования сравнительно медленно срастаются в единый конгломерат.

Наличие в цементе одновременно крупной и мелкой фракций нивелирует отрицательные явления, нарушающие целостность кристаллических структур цементного камня. Для гарантированной безопасной эксплуатации изделий необходимо комплексное присутствие в гранулометрическом составе цемента частиц крупной, средней и мелкой фракций.

Регулируя гранулометрический состав, можно частично компенсировать низкую активность клинкера увеличением тонкости помола. Для предотвращения резких, до 30 % спадов прочности в отдалённые сроки твердения в составе цемента необходимо содержание не менее 20% фракции от 30 до 60 мкм, а для снижения частоты циклов спада-набора прочности, цементу требуется фракция крупнее 60 мкм.

По полученным данным, разнообразие гранулометрического состава цемента обеспечивает минимизацию колебаний предела прочности на сжатие цементного камня, как по абсолютным показателям, так и по длительности периодов спада прочностных характеристик. Гранулометрический состав цемента влияет на частоту и амплитуду колебаний прочности на сжатие и, соответственно, может быть одним из способов управления свойствами цементного камня.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишин Д.А., Ерыгина А.О. Индивидуальное влияние Na_2O и K_2O на свойства портландцементного клинкера // Цемент и его применение. 2021. № 4. С. 64–66.
2. Мишин Д.А., Ковалев С.В., Чекулаев В.Г. Влияние способа ввода минерализатора на характеристики портландцементного клинкера // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 112–117.
3. Коновалов В.М., Гончаров А.А., Федоров А.С., Мошков И.П., Гостев Н.С. Сжигание RDF-топлива с использованием кислородного дутья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86
4. Mishin D.A., Erygina A.O., Tarallo Z.V. The Influence of Electric Current on the Water Separation of Cements // Innovations and Technologies in Construction 2022. Vol. 307. Pp. 342–349. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_43. EDN LWISNH.

5. Erygina A.O., Mishin D.A. Effect of Cubic and Orthorhombic Crystal Systems of Tricalcium Aluminate to Form Ettringite in the Presence of Dihydrate Calcium Sulfate // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 316–321. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_46. EDN FJSFFH.

6. Самченко С.В., Абрамов М.А., Османов А.Б. Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграционной технологии // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36

7. Новоселов А. Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А. Исследование возгонки фтора в процессе обжига клинкера // Техника и технология силикатов. 2024. №. 1. С. 4–13. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-4-13

8. Борисов И.Н., Новоселов А.Г., Никитина М.А., Мануйлов В.Е. Синтез и свойства кальцево-алюмоферритового цемента с использованием техногенных материалов // Техника и технология силикатов. 2024. №. 2. С. 108–117. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-108-117

9. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А. Особенности твердения механоактивированных композиционных цементов // Строительные материалы. 2024. №. 12. С. 21–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-21-27

10. Goloviznina T.Y., Konovalov V.M., Morozova I.A. Sulfoaluminate Cement and Low-Temperature Roasting Additive from Low Aluminate Raw Materials with a High Content of Silicon Oxide // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. T. 147. С. 125–130

11. Пшеничный Г.Н. Природа «пилообразного» твердения цемента // Технологии бетонов. 2019. №5-6. С. 24–26. DOI: 2023/01/25/tb-5-6-2019_24-26/

12. Золотых С.В., Сумской Д.А., Загороднюк Л.Х., Канева Е.В. Микроструктура продуктов гидратации вяжущих композиций, полученных в вихревой струйной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №. 3. С. 9–18. DOI: 10.12737/article_58e23e09e92025.32814168

13. Дерюгин Л.М. Влияние качества цемента на долговечность бетона. Еще раз об обязательной сертификации и нотификации // Технологии бетонов. 2019. №1-2. С. 49–51. DOI: 2023/01/16/tb-1-2-2019_49-51

14. Загороднюк Л.Х., Махортов Д.С., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Дайронас М.В. Роль гранулометрии смешанных вяжущих в формировании микроструктуры и прочности // Вестник БГТУ

им. В.Г. Шухова. 2021. №. 7. С. 33–43.
DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43

15. Кондращенко В.И., Титов С.П. Активация цемента в мельнице вихревого типа. Ч. 1.

Свойства активированного в вихревой мельнице цемента // Техника и технология силикатов. 2019. № 4. С. 115–119.

Информация об авторах

Головизнина Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: t.goloviznina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ерыгина Алена Олеговна, ассистент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: erygalyona@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.11.2024 г.

© Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О., 2025

***Goloviznina T.Y, Erygina A.O.**

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov

**E-mail:t.goloviznina@mail.ru*

GRANULOMETRIC COMPOSITION OF CEMENT AS A METHOD OF CONTROLLING CEMENT STONE PROPERTIES

Abstract. The obtained data demonstrate the dependence of the frequency and amplitude of fluctuations in the compressive strength of cement stone on the granulometric composition of the cement. Using electron microscopy, it was found that the new formations in cement stone made from model coarse-grained cement have greater difficulty growing together into a monolithic conglomerate. Cement stone derived from predominantly coarsely ground cement, compared to stone from finely ground cement, gains strength more slowly. Strength fluctuations in the former occur with lower frequency and amplitude. At later stages of hardening, the strength values recover and increase after a temporary decline. Comparative X-ray phase analysis confirmed the accelerated hydration of fine cement fractions, leading to the formation of fine-crystalline structures prone to recrystallization. Due to recrystallization, cement stone made from finely ground cements is susceptible to cyclic decreases in compressive strength, without full recovery to its early maximum values. Based on the obtained data, to mitigate strength reductions and enhance the strength characteristics of cement stone at later hardening stages, it is necessary to ensure a balanced granulometric composition. This should include a complex mix of coarse (greater than 50 microns), medium (30–50 microns), and fine fractions in the cement.

Keywords: portland cement, cement stone, granulometric composition, hydration products, structure formation, fluctuations in strength characteristics.

REFERENCES

1. Mishin D.A., Erygina A.O. Individual influence of Na₂O and K₂O on the properties of Portland cement clinker. [Individual'noye vliyaniye Na₂O i K₂O na svoystva portlandtsementnogo klinkera]. Cement and its application. 2021. No. 4. Pp. 64–66. (rus)

2. Mishin D.A., Kovalev S.V., Chekulaev V.G. Influence of the method of introducing a mineralizer on the characteristics of portland cement clinker. [Vliyaniye sposoba vvoda mineralizatora na kharakteristiki portlandtsementnogo klinkera]. Cement and its application. 2016. No. 4. Pp. 112–117. (rus)

3. Konovalov V.M., Goncharov A.A., Fedorov A.S., Moshkov I.P., Gostev N.S. Combustion of RDF fuel using oxygen. [Szhiganiye RDF-topлива s ispol'zovaniyem kislorodnogo dut'ya]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86 (rus)

4. Mishin D.A., Erygina A.O., Tarallo Z.V. The Influence of Electric Current on the Water Separation of Cements. Innovations and Technologies in Construction. 2022. Vol. 307. Pp. 342–349. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_43.

5. Erygina A.O., Mishin D.A. Effect of Cubic and Orthorhombic Crystal Systems of Tricalcium Aluminate to Form Ettringite in the Presence of Dihydrate Calcium Sulfate. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 316–321. DOI 10.1007/978-3-030-68984-1_46.

6. Samchenko S.V., Abramov M.A., Osmanov A.B. Analysis of changes in the characteristics of activated cement using disintegrator technology. [Ana-

liz izmeneniya kharakteristik aktivirovannogo tsementa s ispol'zovaniyem dezintegratornoy tekhnologii]. Construction Materials. 2022. No. 11. Pp. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36 (rus)

7. Novosyolov A.G., Dreer Y.I., Novoselova I.N., Levina Y.A. Investigation of fluorine sublimation in the clinker burning process [Issledovaniye vozgonki ftora v protsesse obzhiga klinkera] Technique and technology of silicates. 2024. No. 1. Pp. 4–13. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-4-13(rus)

8. Borisov I.N., Novosyolov A.G., Nikitina M.A., Manuilov V.E. Synthesis and properties of calcium-aluminoferrite cement using man-made materials. [Sintez i svoystva kal'tsiyevo-alyumoferritovogo tsementa s ispol'zovaniyem tekhnogen-nykh materialov]. Technique and technology of silicates. 2024. No. 2. Pp. 108–117. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-108-117 (rus)

9. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A. Features of hardening of mechanically activated composite cements. [Osobennosti tverdeniya mekhanoaktivirovannykh kompozitsionnykh tsementov]. Construction Materials. 2024. No. 12, Pp. 21–27. (rus). DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-21-27

10. Goloviznina T.Y., Konovalov V.M., Morozova I.A. Sulfoaluminate Cement and Low-Temperature Roasting Additive from Low Aluminate Raw Materials with a High Content of Silicon Oxide. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 125–130.

11. Pshenichny G.N. The nature of "sawtooth" cement hardening. [Priroda «piloobraznogo»

tverdeniya tsementa]. Concrete technologies. 2019. No. 5-6. Pp. 24–26. DOI: 2023/01/25/tb-5-6-2019_24-26 (rus)

12. Zolotykh S., Sumskey D.A., Zagorodnyuk L.H., Kaneva E.V. Microstructure hydration products binding composition obtained in the vortex jet mill. [Mikrostruktura produktov gidratatsii vyazhushchikh kompozitsiy, poluchennykh v vikhrevoy struynoy mel'nitse]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 3. Pp. 9–18. DOI: 0.12737/article_58e23e09e92025.32814168 (rus)

13. Deryugin L.M. The influence of cement quality on the durability of concrete. once again about mandatory certification and notification. [Vliyaniye kachestva tsementa na dolgovechnost' betona. Yeshche raz ob obyazatel'noy sertifikatsii i notifikatsii]. Technology of concrete. 2019. No.1-2. Pp. 49–51. DOI: 2023/01/16/tb-1-2-2019_49-51 (rus)

14. Zagorodnyuk L.H., Mahortov D.S., Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Dayronas M.V. Role of granulometry of mixed binders in formation of their microstructure and strength. [Rol' granulometrii smeshannykh vyazhushchikh v formirovanii mikrostruktury i prochnosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43(rus)

15. Kondrashchenko V.I., Titov S.P. Activation of cement in a vortex-type mill. Part 1. Properties of cement activated in a vortex mill. [Aktivatsiya tsementa v mel'nitse vikhrevogo tipa. CH. 1. Svoystva aktivirovannogo v vikhrevoy mel'nitse tsementa]. Technique and technology of silicates. 2019. No. 4. Pp. 115–119. (rus)

Information about the author

Goloviznina, Tatyana Y. PhD, Assistant professor. E-mail: t.goloviznina@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Erygina, Alena O. Assistant. E-mail: erygalyona@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 26.11.2024

Для цитирования:

Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О. Способ управления свойствами цементного камня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 83–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91

For citation:

Goloviznina T.Y., Erygina A.O. Granulometric composition of cement as a method of controlling cement stone properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 83–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-92-108

¹Герасимов М.Д., ^{1,*}Любимый Н.С., ¹Латышев С.С.,²Маслов А.С., ¹Кислицын А.Е., ¹Четвериков Б.С.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²ООО «ПромДеталь»

*E-mail: nslubim@bk.ru

АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОДНОВАЛЬНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КАТКОВ

Аннотация. Объектом исследования являются малогабаритные одновальцовые вибрационные дорожные катки, необходимые для уплотнения грунтов и асфальтобетонных покрытий в ограниченных условиях, включая городскую застройку, подъездные пути и пешеходные зоны. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности дорожной техники в условиях роста требований к качеству и скорости строительства, а также с учётом возникновения современных технологий и материалов. Методы исследования включают анализ открытых источников, патентной документации, а также разработку расчётного модуля в среде MS Excel для проектирования оптимальных параметров вибрационных систем. Основные научные результаты заключаются в разработке принципиально нового закона движения рабочего процесса, основанного на асимметричных колебаниях, который позволяет улучшить показатели уплотнения при снижении массы катка. Кроме того, в работе представлены рекомендации по применению новых вибрационных устройств с высоким коэффициентом асимметрии, что открывает перспективы для их широкого развития. Полученные результаты позволяют создать более эффективные и экономичные конструкции дорожных катков для использования в различных условиях эксплуатации. В статье рассмотрены законы изменения силового воздействия на рабочее оборудование малогабаритного одновальцового катка – валец и предложен принципиально новый вариант идеального закона колебаний, генерируемого вибрационным устройством.

Ключевые слова: каток, дорожный, вибрации, малогабаритный, одновальный, движущая сила, параметры вибрации, закон движения рабочего оборудования

Введение. В процессе развития конструктивных решений по совершенствованию дорожных катков отечественными и зарубежными производителями можно наблюдать некоторые характерные этапы их развития, начиная с прицепных статических и до самоходных вибрационных с управляемыми параметрами вибрации. Информация о накопленном опыте проектирования и создания вибрационных дорожных катков и их классификационных схемах в достаточной степени отражены в технической и справочной литературе [1–3]. В реализации задач совершенствования конструкций дорожных катков можно выделить два направления. Первое направление характеризуется тем, что создаётся конструкция дорожного катка с определёнными техническими характеристиками и в дальнейшем определяются те технологические параметры, которые можно реализовывать созданной машиной в различных конкретных условиях [4–5], условно – «от конструкции к технологии». Во втором случае, на основе исследования физико-механических и реологических свойств уплотняемых сред определяются рациональные технологические параметры для тех или иных конкретных условий и под них создаются конструктивные решения с заданными

конструктивными характеристиками [6 – 9], условно – «от технологии к конструкции». При этом, не исключается применение комбинированного подхода к решению таких задач. Применение малогабаритных двухвальцовых катков с массой до $M \cong 1500$ кг вызвало значительное сокращение интереса к одновальцовым малогабаритным вибрационным каткам с массой в пределах 100... 300 кг. Однако, современные конструктивные решения могут позволить подойти к вопросу совершенствования таких катков с более эффективными показателями при их использовании.

Типовая конструкция малогабаритного одновального вибрационного катка может включать вибрационный механизм и привод передвижения и [1] (рис. 1).

Вибрационный валец, выполненный в виде цилиндрической трубы, во внутренней части которого встроены два рабочих узла: вибрационный узел, (включает позиции 1, 2, 4 – 7, 11 и 12); и узел привода вращения и перекачивания цилиндрического вальца (8 и 10). Таким образом, в конструкции вибрационного вала используются два механизма, один из которых обеспечивает движение вальца по уплотняемой поверхности

со скоростью v , м/с, а второй, создание круговой вынуждающей силы $F_{\downarrow}$, кН.

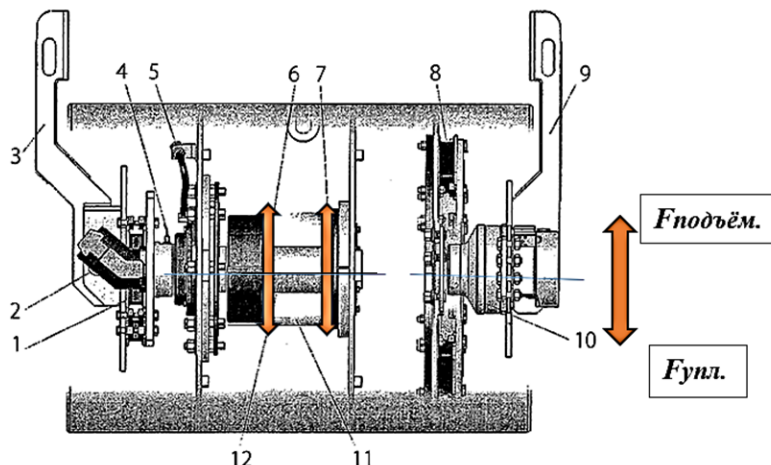


Рис. 1. Схема компоновки вибрационного вальца

1, 8 – амортизаторы; 2, 10 – гидромоторы; 3, 9 – опоры; 4 – датчик частоты оборотов; 5 – заливная пробка; 6, 7 – дебаланс; 11 – корпус вибратора; 12 – вибровал

Материалы и методы. В работе использованы методы анализа открытых источников информации в области исследования, проектирования и расчёта конструктивных и технологических параметров дорожных катков, размещённых в отечественных, зарубежных научных публикациях и в патентной документации. Учитывая, что в работе дорожного катка задействована комбинация сил: статическая сила веса катка и вынуждающая сила вибрационного устройства, то в работе используется методика проектирования, связанная с разработкой «идеального закона» [10, 11] движения рабочего органа вибрационной машины. При разработке идеального закона колебаний вибрационного малогабаритного одновального дорожного (далее - ВМОД) катка использованы принципы метода наложения быстрых процессов на медленные [12 - 14]. В работе использовался разработанный авторами расчётный модуль и математический аппарат для программного продукта MS Excel, который позволяет определять зависимые параметры колебательной системы и производить построение соответствующих графиков и функциональных зависимостей.

Основная часть. Для уплотнения материала дорожными катками используются некоторые общепринятые «законы» нагружения, т.е. форма колебаний, комбинации действующих сил, величина и поведение суммарной вынуждающей силы и параметрами всех её составляющих.

Простейшим законом [1, 2, 15] изменения и поведения вынуждающей силы для дорожного катка является

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

где F – вынуждающая сила вибратора с круговыми колебаниями с массой дебаланса (m), со смещённым центром тяжести (r) и угловой скоростью вращения (ω), соответственно (кг, м, рад/с).

Данный закон (1) изменения вынуждающей (уплотняющей) силы позволяет получить круговую силу, соответствующую синусоидальному закону. При вращении дебалансов с частотой n (об/мин) или f (об/с) имеем продолжительность циклического воздействия $T = \frac{1}{f}$ (с), в пределах которого вынуждающая сила F (Н) имеет в вертикальном направлении равные по величине значения сил: $F_{\uparrow} = F_{\downarrow}$, рис. 2.

Причем: $F_{\downarrow}$ направлена на выполнение полезной работы – уплотнение, $F_{\uparrow}$ – на выполнение холостого хода – на подъём (подскок) катка.

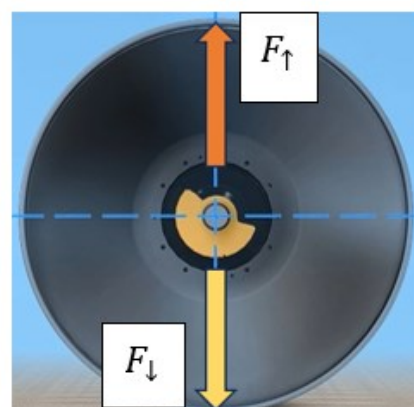


Рис. 2. Схема возбуждения вибрации вальца круговой вынуждающей силой

$F_{\downarrow}$ – действие вынуждающей силы в направлении выполнения полезной работы по уплотнению грунта, $F_{\uparrow}$ – тоже, в направлении «холостого хода»

Второй вариант закона изменения величины вынуждающей силы может быть записан в форме:

$$F = \begin{cases} m_1 \cdot r_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos(\omega_1 t), & \text{при } \omega - \text{ по часовой стрелке} \\ m_2 \cdot r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\omega_2 t), & \text{при } \omega - \text{ против по часовой стрелки} \end{cases} \quad (2)$$

Конструктивная особенность такого вибрационного устройства заключается в том, что на общем валу закреплены два дебаланса. Один дебаланс закреплён на валу неподвижно, а второй, с возможностью поворота на некоторый угол при изменении направления вращения вала [16 - 18].

В таком законе величина суммарной вынуждающей силы неподвижного и подвижного дебаланса при вращении вала против часовой стрелки

имеет меньшую величину при снижении суммарного статического момента, рис. 3.

$$M_2 = m_2 \cdot r_2 < m_1 \cdot r_1 = M_1,$$

что позволяет получить:

$$F_G > F_O \quad (3)$$

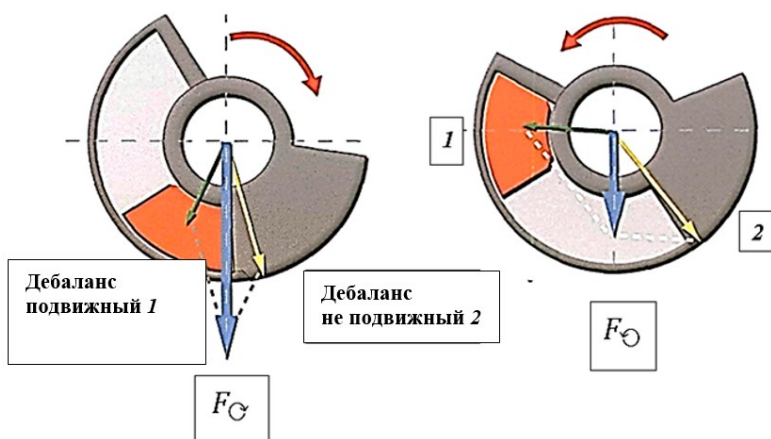


Рис. 3. Схема возбуждения вибрации круговой вынуждающей силой у вальца с изменяемым направлением вращения дебалансного вала

а, б – вращение дебалансного вала по и против часовой стрелки, F_G, F_O – суммарная вынуждающая сила, соответственно при вращении дебалансного вала по и против часовой стрелки,

1 и 2 – соответственно, неподвижный и подвижный дебаланс

Следующий закон изменения вынуждающей силы для дорожных катков может быть представлен в виде:

$$F = m_1 \cdot r_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos \omega t + m_1 \cdot r_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

При сложении двух равнозначных колебаний при встречном вращении дебалансов генерируются направленные колебания вдоль перпендикуляра к середине линии, соединяющей центры вращения двух дебалансных валов, рис. 4.

Направленные колебания, у которых вынуждающая сила действует вдоль некоторой прямой линии, имеет существенное преимущество перед круговыми. Она, как правило, направляется непосредственно на выполнение полезной работы, без рассеивания по окружности и без раскачивания системы.

$$F = F_{\downarrow} = F_{\uparrow} = F_{1G} + F_{1O} \quad (5)$$

где $F_{\downarrow}$ и $F_{\uparrow}$ – суммарная вынуждающая сила, направленная на выполнение полезной и «холостой» работы, соответственно.

Наряду с вынуждающей силой вращающегося инерционного вибрационного тела – дебаланса, существенное влияние на процесс уплотнения грунта оказывает масса колеблющейся части катка и соотношение веса этой части и величины вынуждающей силы $\left(\frac{G_K}{F}\right)$ или $\left(\frac{F}{G_K}\right)$.

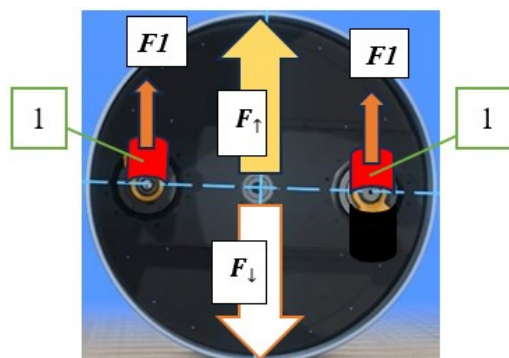


Рис. 4. Схема возбуждения вибрации двумя круговыми вынуждающими силами F_1 , генерирующими суммарную вынуждающую силу направленных колебаний F ,

Одним из основных параметров дорожных катков вообще, и малогабаритных в частности, является масса катка (m_k) или вальца, которая участвует в колебательном движении и определяет его вес ($G_k = m_k \cdot g$). Масса дебаланса (m_d), вращающаяся вокруг центра вращения, расположенного в центре окружности поперечного сечения вальца с угловой скоростью (ω_d), с центром

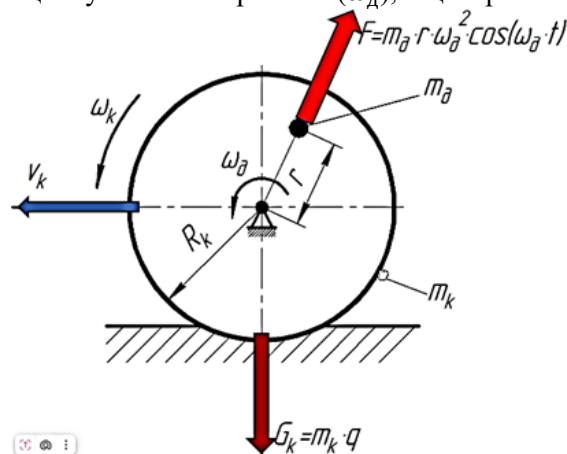


Рис. 5. Схема нагружения вальца катка

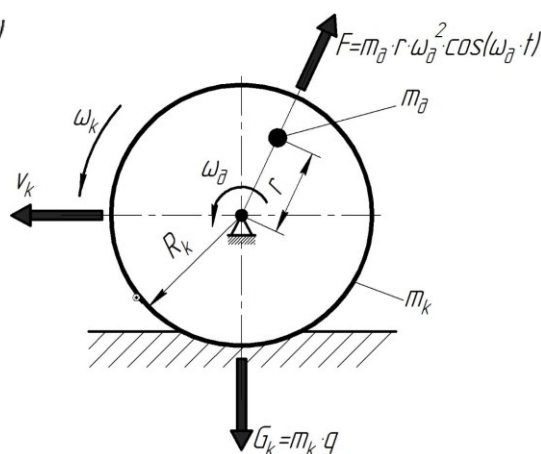
v – скорость передвижения катка (м/с), ω_k – угловая скорость вальца при перекатывании

действующей вдоль вертикальной оси, 1 – дебалансы с круговой вынуждающей силой.

массы на расстоянии (r) от центра вращения генерирует вынуждающую круговую силу

$$F = m_d \cdot r \cdot \omega_d^2 \cdot \cos \omega_d t \quad (6)$$

Схема нагружения вальца катка приведена на рис. 5.



Для выбора и определения параметров вибрационного процесса уплотнения грунта катками, целесообразно рассмотреть характерные варианты соотношения величины вынуждающей силы вибрационного устройства катка и его веса, колеблющейся массы ($\frac{F}{G_k}$). Для простейшего случая принимаем величину силы тяжести катка $G_k = 1000$ Н. Варианты соотношения величины вынуждающей силы вибрационного устройства катка и его веса, колеблющейся массы, ($\frac{F}{G_k}$) могут принимать следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} 1) & F \ll G_k \rightarrow (200 \ll 1000); \\ 2) & F < G_k \rightarrow (800 < 1000); \\ 3) & F = G_k \rightarrow (1000 = 1000); \\ 4) & F > G_k \rightarrow (1200 > 1000); \\ 5) & F \gg G_k \rightarrow (2000 \gg 1000); \\ 6) & F \gg G_k \rightarrow (4000 \gg 1000) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для численного расчёта по каждому варианту выражения (7) формируем исходные данные из условия, что величина вынуждающей круговой силы (F) составляет, соответственно 200, 800, 4000 Н. Исходные параметры для (7) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры для численного расчёта по выражению (7)

Вариант	n	f	T	dt	ω	r	m	$m \cdot r$
	об/мин	Гц	с	с	рад/с	м	кг	кг*м
1	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,325	0,1	0,0325
2	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,325	0,4	0,13
3	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,325	0,5	0,1625
4	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,325	0,6	0,195
5	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,325	1	0,325
6	750	12,5	0,08	0,004	78,5	0,65	1	0,65

Результаты расчёта величины вынуждающей силы (F) и суммарной силы $F_{\text{сум}}$ (Н), для варианта 1 (7), приведены в табл. 2

График изменения величины вынуждающей силы при наличии силы веса катка, приведен на рис. 6.

Результаты расчёта величины вынуждающей силы (F) и суммарной силы $F_{\text{сум}}$ (Н), для варианта 2 (7), приведены в табл. 3.

Таблица 2

Расчёт величин суммарной вынуждающей силы при соотношении $F \ll G_k = 200 \ll 1000$

dt	ω	m	r	F	G	$F_{\text{сум}}$
0	78,5	0,1	0,325	-200,3	-1000	-1200,3
0,004	78,5	0,1	0,325	-190,4	-1000	-1190,4
0,008	78,5	0,1	0,325	-161,9	-1000	-1161,9
0,012	78,5	0,1	0,325	-117,5	-1000	-1117,5
0,016	78,5	0,1	0,325	-61,7	-1000	-1061,7
0,02	78,5	0,1	0,325	0,2	-1000	-999,8
0,024	78,5	0,1	0,325	62,0	-1000	-938
0,028	78,5	0,1	0,325	117,8	-1000	-882,2
0,032	78,5	0,1	0,325	162,1	-1000	-837,9
0,036	78,5	0,1	0,325	190,5	-1000	-809,5
0,04	78,5	0,1	0,325	200,3	-1000	-799,7
0,044	78,5	0,1	0,325	190,5	-1000	-809,5
0,048	78,5	0,1	0,325	162,1	-1000	-837,9
0,052	78,5	0,1	0,325	117,8	-1000	-882,2
0,056	78,5	0,1	0,325	62,0	-1000	-938
0,06	78,5	0,1	0,325	0,2	-1000	-999,8
0,064	78,5	0,1	0,325	-61,7	-1000	-1061,7
0,068	78,5	0,1	0,325	-117,5	-1000	-1117,5
0,072	78,5	0,1	0,325	-161,9	-1000	-1161,9
0,076	78,5	0,1	0,325	-190,4	-1000	-1190,4
0,08	78,5	0,1	0,325	-200,3	-1000	-1200,3

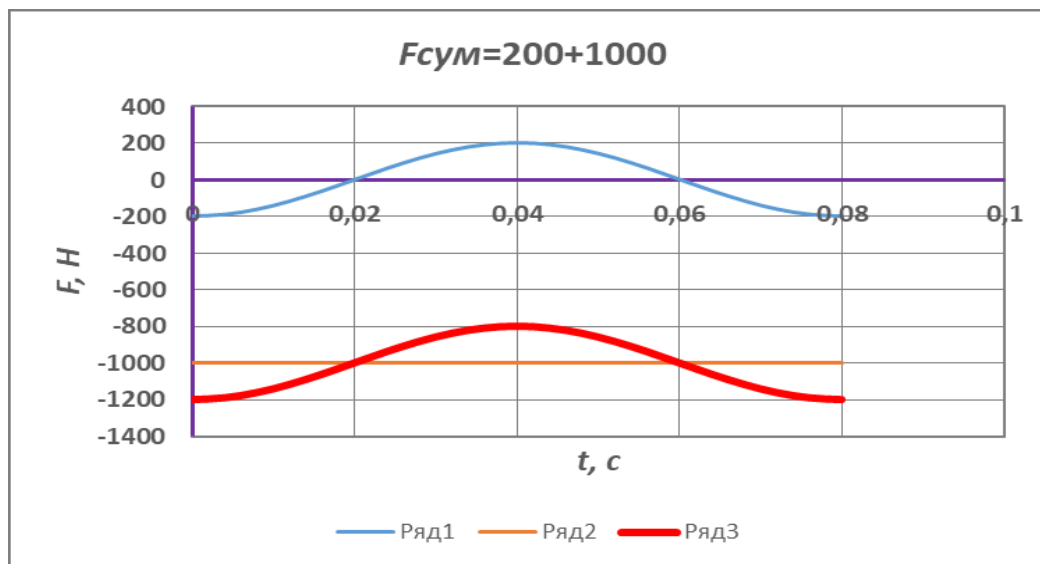


Рис. 6. Изменения величины вынуждающей (Ряд 1) и суммарной (ряд 3) силы F (Н) при наличии силы веса катка (Ряд 2) при соотношении $F \ll G_k = 200 \ll 1000$

График изменения величины вынуждающей силы при наличии силы веса катка, приведен на рис. 7.

Расчёты, табл. 3, и график, рис. 7, показывают, что соотношение величины вынуждающей

силы вибрационного колебания и веса дорожного катка формируют условия уплотнения, сравнимые со статическим методом. Суммарная сила уплотнения $F_{\text{сум}} = F + G_k$, направлена, рис.

7, в сторону уплотнения грунта, на что указывает знак минус.

Закон движения центра массы колеблющейся части малогабаритного одновальцового катка для вариантов 1 и 2 (7) при $F \ll G_k$ и при $F < G_k$ запишется в виде

$$F_{\text{сум}} = F + G_k = G + m_d \cdot r_d \cdot \omega_d^2 \cdot \cos(\omega_d t) \quad (8)$$

Выполняя последовательно расчёты для вариантов 3...6 (7) составляем таблицу результатов, табл. 4.

Таблица 3

Расчёт величин суммарной вынуждающей силы при соотношении $F \ll G_k = 800 \ll 1000$

dt	ω	m	r	F	G	$F_{\text{сум}}$
0	78,5	0,4	0,325	-801,091	-1000	-1801,09
0,004	78,5	0,4	0,325	-761,529	-1000	-1761,53
0,008	78,5	0,4	0,325	-647,497	-1000	-1647,5
0,012	78,5	0,4	0,325	-470,148	-1000	-1470,15
0,016	78,5	0,4	0,325	-246,823	-1000	-1246,82
0,02	78,5	0,4	0,325	0,637931	-1000	-999,362
0,024	78,5	0,4	0,325	248,0365	-1000	-751,963
0,028	78,5	0,4	0,325	471,18	-1000	-528,82
0,032	78,5	0,4	0,325	648,2474	-1000	-351,753
0,036	78,5	0,4	0,325	761,9237	-1000	-238,076
0,04	78,5	0,4	0,325	801,0925	-1000	-198,908
0,044	78,5	0,4	0,325	761,9237	-1000	-238,076
0,048	78,5	0,4	0,325	648,2474	-1000	-351,753
0,052	78,5	0,4	0,325	471,18	-1000	-528,82
0,056	78,5	0,4	0,325	248,0365	-1000	-751,963
0,06	78,5	0,4	0,325	0,637931	-1000	-999,362
0,064	78,5	0,4	0,325	-246,823	-1000	-1246,82
0,068	78,5	0,4	0,325	-470,148	-1000	-1470,15
0,072	78,5	0,4	0,325	-647,497	-1000	-1647,5
0,076	78,5	0,4	0,325	-761,529	-1000	-1761,53
0,08	78,5	0,4	0,325	-801,091	-1000	-1801,09

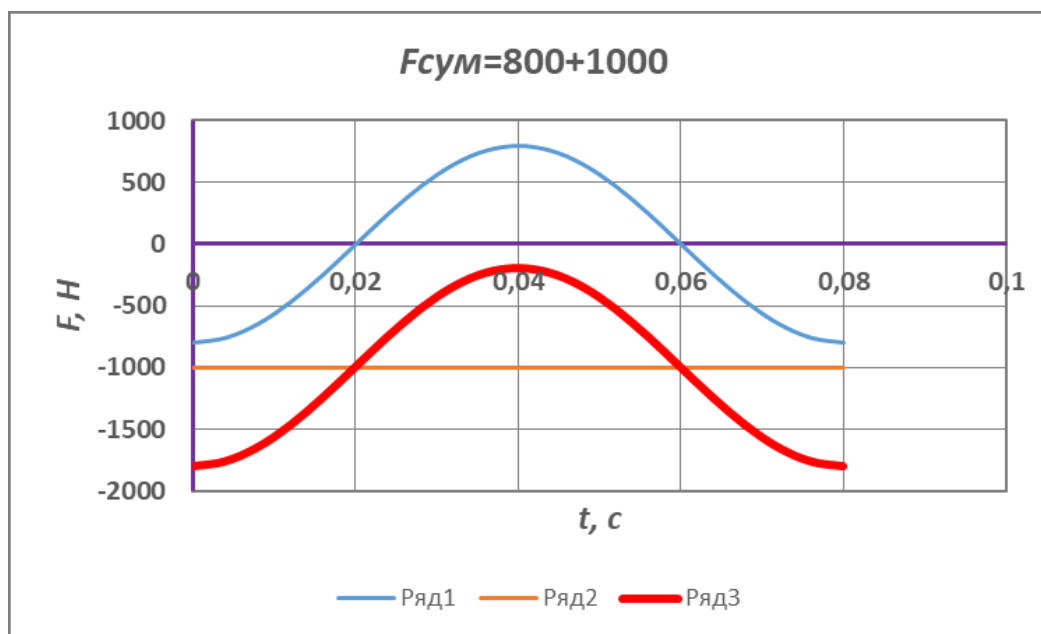
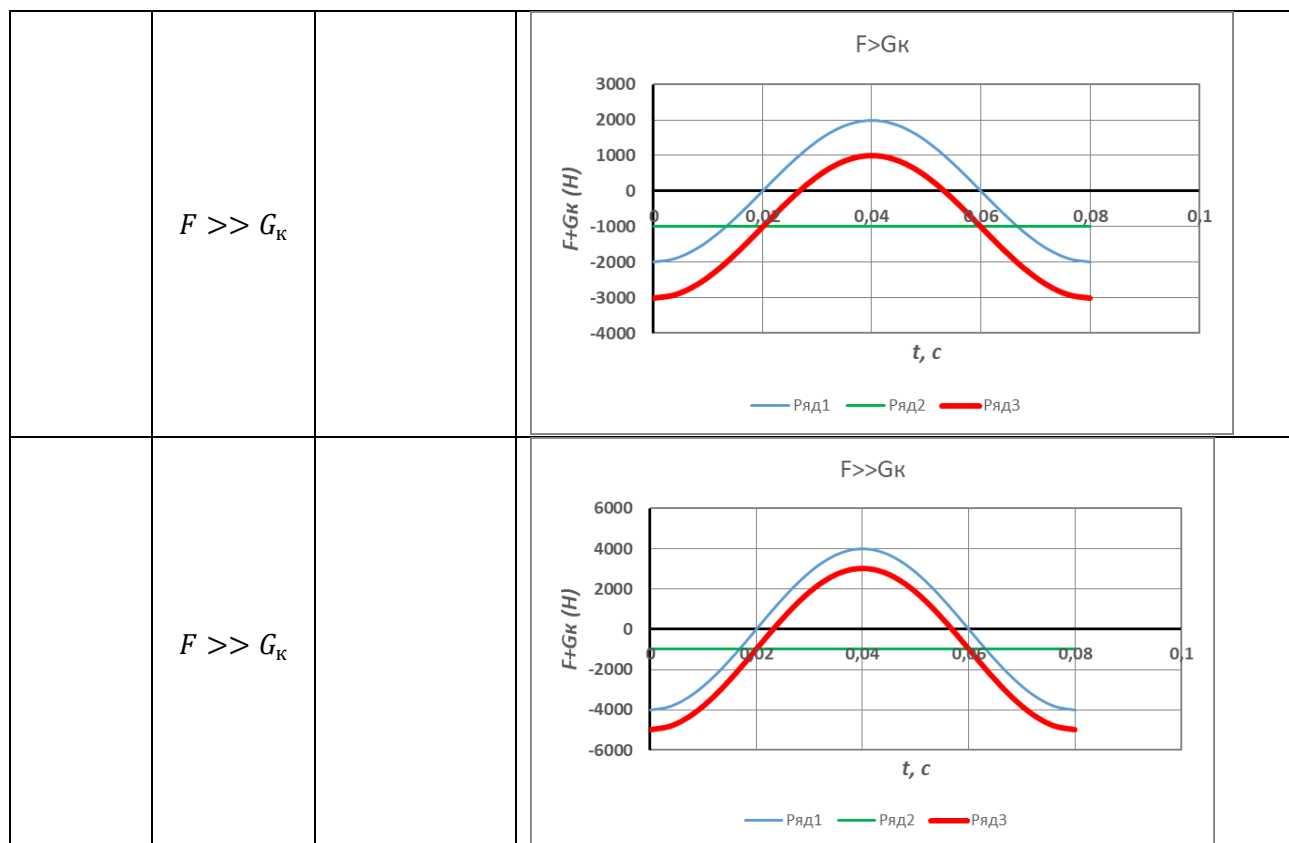


Рис. 7. Изменения величины вынуждающей (Ряд 1) и суммарной (ряд 3) силы F (Н) при наличии силы веса катка (Ряд 2) при соотношении $F \ll G_k = 800 \ll 1000$

Таблица 4

Результаты расчёта по вариантам соотношений вынуждающей вибрационной силы и веса катка, в соответствии с исходными параметрами табл. 1.

Вариант	Соотношение сил		Графики изменения величины вынуждающей (Ряд 1) и суммарной (ряд 3) силы F (Н) при наличии веса катка (Ряд 2), при соответствующих соотношениях F и G_k
	F/G_k	пример	
	$F \ll G_k$		
	$F < G_k$		
	$F = G_k$		
	$F > G_k$		



Из приведенных результатов расчёта и поведения рассматриваемых параметров, следует выделить некоторые очевидные особенности и закономерности.

Так, в варианте 3, величина вынуждающей силы колебаний сопоставима с весом катка, т.е. $F = G_k$, суммарное усилие в направлении выполнения полезной работы достигает $F_{\text{сум}} = F_{\downarrow} = 2000 \text{ (H)}$, а в направлении выполнения холостого хода, на подъём катка, составляет $F_{\text{сум}} = F_{\uparrow} = 0$. Таким образом, формируется пограничное состояние между контактом и отрывом катка от уплотняемого грунта.

В варианте 4 величина составляющей вынуждающей силы, направленной вверх, в сторону выполнения «холостого» хода формирует условия отрыва вальца катка от грунта. В силу того, что данная составляющая вынуждающей силы мала по сравнению с весом катка, она не в состоянии существенно влиять на процесс взаимодействия катка с грунтом.

В варианте 5 величина вынуждающей силы, направленной вверх, в сторону выполнения «холостого» хода превосходит по величине вес катка, и может обеспечить отрыв катка от грунта. При этом, составляющая вынуждающей силы в направлении выполнения процесса уплотнения грунта составляет по модулю $F = 2000 + 1000 = 3000 \text{ (H)}$, а в направлении «холостого» хода - $F = 2000 - 1000 = 1000 \text{ (H)}$.

При существенном превышении величины составляющей вынуждающей силы над силой веса катка (7), вариант 6, возникает опасность возникновения ситуации, когда частота собственных колебаний катка войдёт в противофазу с частотой вынужденных колебаний от вибрационного устройства. При этом, разность фаз собственных и вынужденных колебаний может составлять $0\text{-}\pi$ радиан. При этом, происходит снижение эффективности уплотнения из-за снижения величины суммарной вынуждающей силы на 67 %, рис. 8.

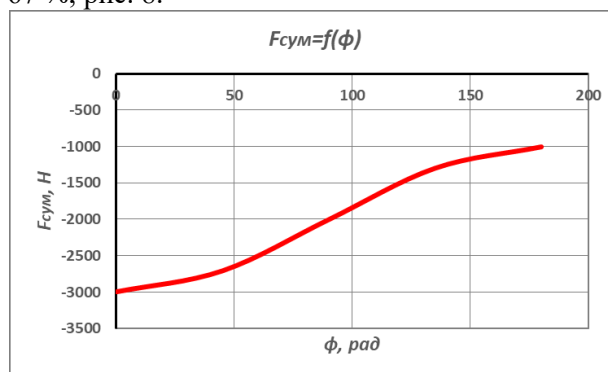


Рис. 8. График снижения модуля величины суммарной вынуждающей силы $F_{\text{сум}} = 3000 \text{ (H)}$, действующей в направлении выполнения полезной работы при переходе собственных частот колебаний катка в противофазу с вынуждающей силой вибрационного устройства до $F_{\text{сум}} = 1000 \text{ (H)}$

Таким образом, при нарушении синхронности в работе вынуждающей силы вибрационного устройства и собственных колебаний катка при отрыве от грунта в пределах угла сдвига фаз $0...180^\circ$, происходит снижение величины суммарной вынуждающей силы на 67 %, с 3 кН до 1 кН. Превышение величины вынуждающей силы, направленной на выполнение «холостого» хода силы веса катка, приближает процесс уплотнения к некоторому пограничному условию, когда возможен сход частоты колебаний катка с расчётного и переход к неуправляемому противофазному действию приложенных сил. В варианте 6 составляющая суммарной вынуждающей силы, направленная вверх, в сторону выполнения «холостого» хода, составляет 2000 (Н), что в два раза превышает вес катка. Величина такого усилия позволяет может приводить к отрыву катка от грунта и вызывать появление противофазных колебаний вынуждающей силы вибрационного устройства и силы веса катка.

Таким образом, колебания от круговой вынуждающей силы вибрационного устройства малогабаритного катка достаточно жёстко связаны с его массой и весом. Очевидно, что составляю-

щая вынуждающей силы вибрационного устройства, направленная вверх, в сторону выполнения «холостого» хода, не должна превышать по величине силу веса самого катка.

Возможность повышения эффективности работы малогабаритных дорожных катков связано с созданием и использованием не симметричных вынужденных колебаний в самом вибрационном устройстве. В практике реализации и использования данного направления совершенствования дорожных катков информация отсутствует. Однако, в практике патентования имеется ряд технических решений [19–25], относящихся к вибрационным устройствам, которые могли бы послужить прообразом не симметричных, или асимметричных, колебаний в конструкции малогабаритных одновальцовых дорожных катков.

Наглядным примером возможности использования не симметричных, «комбинированных», по [22], колебаний может послужить само техническое решение [22], если на его основе провести численные расчёты.

Вибрационный механизм [22] установлен в продольном сечении вальца и представляет собой две пары дебалансных валов 1 и 2 (рис. 9, а).

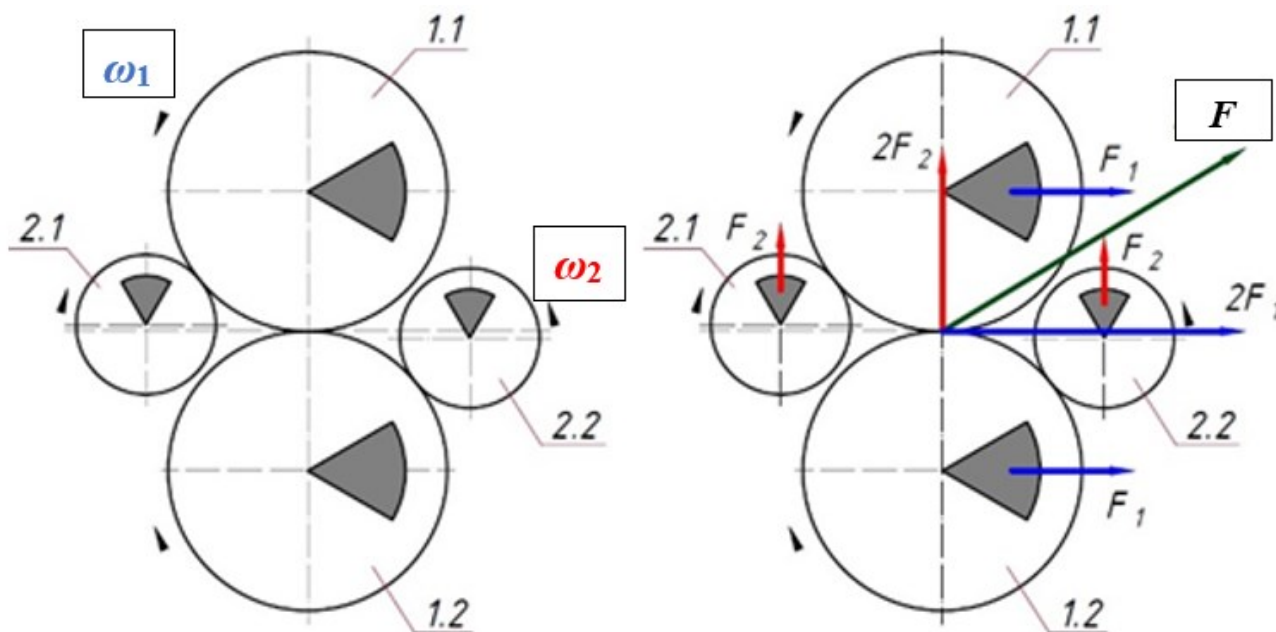


Рис. 9. Схема вибрационного устройства [22]
а – схема кинематическая, б – схема действующих сил

Концы валов 1 содержат большие зубчатые колёса с дебалансами 1.1 и 1.2. Концы валов 2 содержат зубчатые колёса 2.1 и 2.2. Соотношение делительных диаметров колёс дебалансных валов 1 и 2 составляет 2:1. Зубчатое колесо 1.1 находится в зацеплении с зубчатыми колёсами 1.2 и 2.1. Зубчатое колесо 1.2 находится в зацеп-

лении с зубчатыми колёсами 1.1 и 2.2. Таким образом соотношение угловых частот составляет: $\omega_2 = 2\omega_1$. Силы F_1 действуют вдоль продольной оси барабана, образуя общую продольную силу $2F_1$. Силы F_2 действуют вертикально, образуя общую вертикальную силу, направленную на уплотнение материала, $2F_2$. Сумма этих сил образует суммарную вынуждающую силу

$$F = 2F_1 + 2F_2 \quad (9)$$

При этом, величина суммарной силы, $F_{\text{сум}}$, с учётом силы тяжести катка G_k составляет:

$$F_{\text{сум}} = F + G_k = 2F_1 + 2F_2 + G_k \quad (10)$$

где F – вынуждающая сила вибрационного устройства, рис. 9.

Суммарная вынуждающая сила в конечном счёте определяет характер колебаний одновальцового вибрационного катка.

Выполненные ранее численные расчёты для варианта 3 табл. 4 могут быть исходными данными для численного расчёта.

Зададимся следующими исходными параметрами:

– частота вращения дебалансных валов: $n_1=500$ об/м, $n_2 = 1000$ об/м,

– угловая скорость дебалансных валов: $\omega_1 = 52,3$ p/c; $\omega_2 = 104,7$ p/c,

– амплитудное значение вынуждающей силы вибрационного устройства в направлении выполнения «холостого» хода: $F = F_{\text{хх}} = 1000$ (Н).

Через статические моменты дебалансов определяются масса дебалансов и эксцентриситет центра масс:

– эксцентриситет дебалансов: $r_1=3$ см; $r_2 = 3$ см.

– масса дебалансов: $m_1=6,1$ кг, $m_2=1,52$ кг,

В работе [22] введены некоторые особенности или ограничения: первый – линия нейтрали зацепления зубчатых колёс 1.1 и 1.2 лежит ниже продольной оси вальца для снижения влияния возможного момента опрокидывания вальца от действия силы $2F_1$, второй – центры вращения валов, соответственно, зубчатого колёса 2.1 лежит выше линии нейтрали зацепления зубчатых колёс 1.1 и 1.2, а зубчатого колёса 2.2 лежит ниже линии указанной нейтрали. Это вызвано, прежде всего тем, чтобы вывести из зацепления зубчатые колёса 1.1 и 2.2, а также, зубчатые колёса 1.2 и 2.1. При этом, образуется некоторый момент, при вращении зубчатых колёс 2.1 и 2.2, который не оказывает существенно влияния на общий процесс.

В первый момент (рис. 9, а) в вертикальной плоскости действует максимальная сила $2F_2$, а сила $2F_1 = 0$. Далее, в пределах периода колебания ($T = 0,12$ с) происходит изменение проекции величины $2F_2$ и величины $2F_1$ и как результат, величины $F_{\text{сум}}$.

Исходные параметры сводим в расчётную таблицу (табл. 5).

Таблица 5

Исходные параметры для численного расчёта [22]

рi	№ вибратора	1	2	3	4
3,1416	Масса (кг)	6,1	6,1	1,52	1,52
	Радиус (см)	3	3	3	3
T	Нач. фаза (град)	0	0	0	0
0,12	Скорость (об/мин)	500	500	1000	1000
dt	R (м)	0,03	0,03	0,03	0,03
0,006	ϕ_0 (рад)	0	0	0	0
	ω (1/с)	52,36	52,36	104,72	104,72

Расчёт проведен по 20 значащим точкам в пределах периода, в котором происходит одно колебание силы дебалансов на зубчатых колёсах 1.1 и 1.2 и два полных колебания сил дебалансов на зубчатых колёсах 2.1 и 2.2. Эти колебания симметричны относительно нейтральной оси и составляют, соответственно, значение ± 1000 Н, с соотношением модулей $k = 1,0$. Максимальное значение модуля силы $F_{\text{сум}}$ составляет: $F_{\text{сум,нб}}=2000$ Н, в направлении выполнения полезной работы, а минимальное – $F_{\text{сум,нм}} = 1121$ Н, в направлении выполнения холостого хода.

Таким образом, в вертикальной плоскости создаётся асимметрии величины вынуждающей силы, которая составляет: $k = 1.79$ (табл. 6).

График изменения величины вынуждающей силы пары 1.1 и 1.2 представлен на рис. 10.

График изменения величины вынуждающей силы пары 2.1 и 2.2 представлен на рис. 11.

На рис. 12 представлены совместно графики изменения вынуждающих сил пары 1.1 и 1.2, а также, пары 2.1 и 2.2.

Наибольшей информативностью численного анализа является график (рис. 13), на котором отражён график изменения суммарной вынуждающей силы, ряд 1.

Таблица 6

**Результаты расчёта параметров вынуждающей силы вибрационного устройства
по исходным данным, обозначенным в [22]**

№	t	F_1	F_1	F_2	F_2	$2F_1$	$2F_2$	$F_{\text{сум}}$
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-
0	0	0	0	500	500	0	1000	1000
1	0,006	154,3	154,3	404,5	404,5	308,6	809	1117,6
2	0,012	293,6	293,6	154,6	154,6	587,2	309,2	896,4
3	0,018	404,2	404,2	-154,3	-154,3	808,4	-308,6	499,8
4	0,024	475,3	475,3	-404,4	-404,4	950,6	-808,8	141,8
5	0,03	500	500	-500	-500	1000	-1000	0
6	0,036	475,9	475,9	-404,7	-404,7	951,8	-809,4	142,4
7	0,042	405,3	405,3	-154,9	-154,9	810,6	-309,8	500,8
8	0,048	295,1	295,1	154,1	154,1	590,2	308,2	898,4
9	0,054	156,1	156,1	404,2	404,2	312,2	808,4	1120,6
10	0,06	1,8	1,8	500	500	3,6	1000	1003,6
11	0,066	-152,6	-152,6	404,9	404,9	-305,2	809,8	504,6
12	0,072	-292,2	-292,2	155,2	155,2	-584,4	310,4	-274
13	0,078	-403,1	-403,1	-153,8	-153,8	-806,2	-307,6	-1113,8
14	0,084	-474,8	-474,8	-404	-404	-949,6	-808	-1757,6
15	0,09	-500	-500	-500	-500	-1000	-1000	-2000
16	0,096	-476,4	-476,4	-405,1	-405,1	-952,8	-810,2	-1763
17	0,102	-406,3	-406,3	-155,5	-155,5	-812,6	-311	-1123,6
18	0,108	-296,5	-296,5	153,5	153,5	-593	307	-286
19	0,114	-157,8	-157,8	403,9	403,9	-315,6	807,8	492,2
20	0,12	-3,6	-3,6	500	500	-7,2	1000	992,8
	Max							-2000
	Min							1121
	кac							1,79

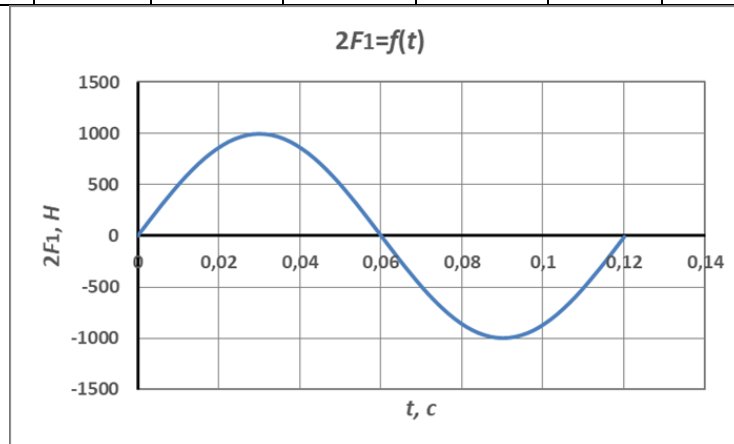


Рис. 10. изменения величины вынуждающей силы пары 1.1 и 1.2.

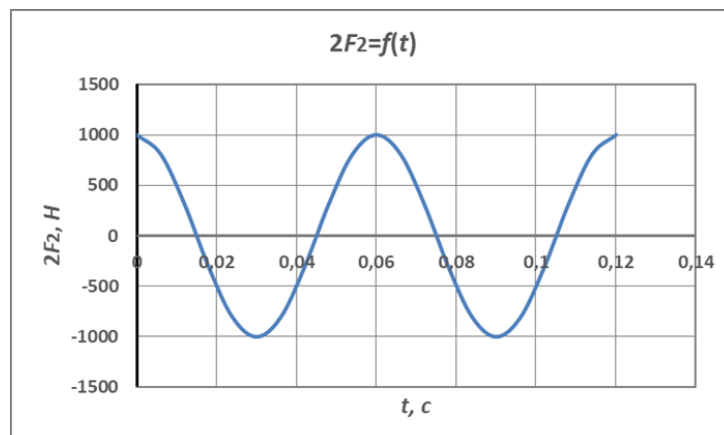


Рис. 11. Изменения величины вынуждающей силы пары 2.1 и 2.2.

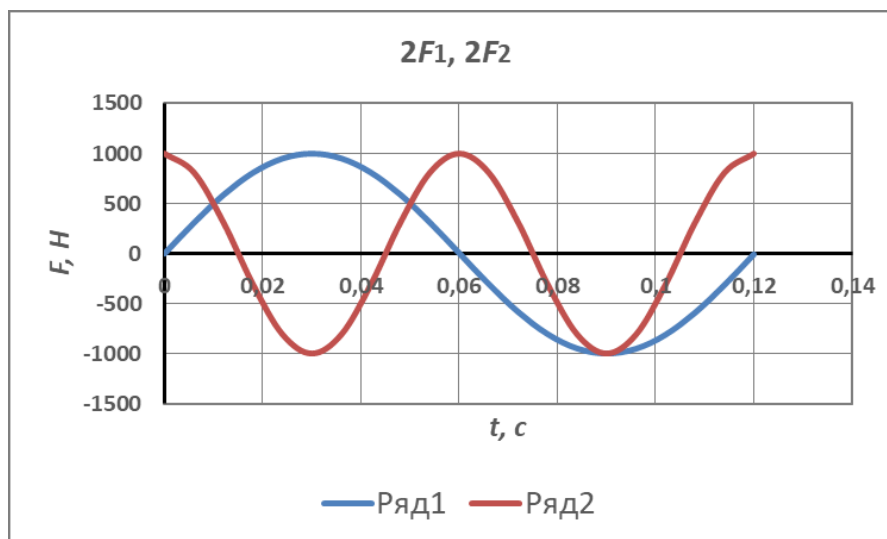


Рис. 12. Графики изменения вынуждающих сил пары 1.1 и 1.2, ряд 2, а также, пары 2.1 и 2.2, ряд 1

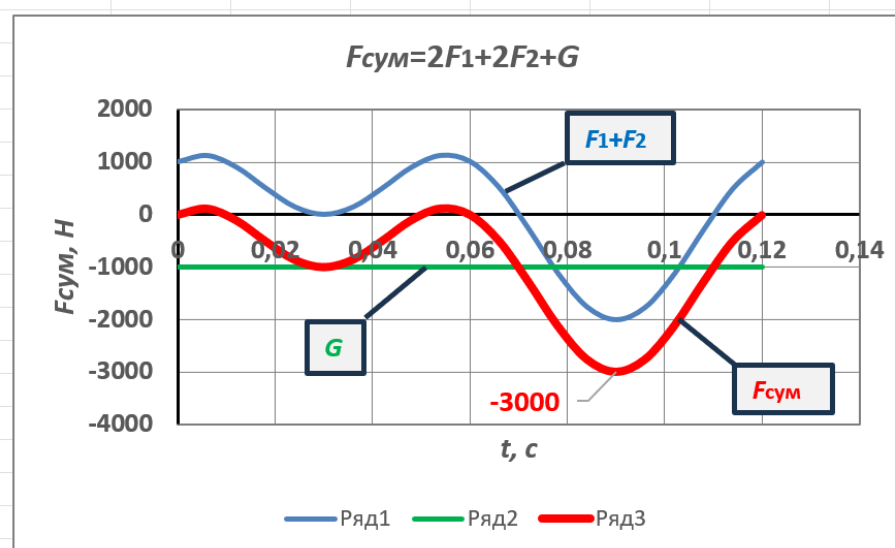


Рис. 13. Графики численного анализа по заявленным предложениям технического решения [22]

Из расчёта (табл. 6) и графика (рис. 13) видно, что суммарная величина вынуждающей силы является асимметричной относительно нейтральной оси и коэффициент асимметрии при этом составляет: $k = 1,79$.

Выполненный численные расчёты на базе патента [22] показывает, что данное техническое решение, содержащие две ступени вибрационного устройства с кратными частотами вращения дебалансных валов, позволяют получать асимметричные колебания с существенным превышением величины вынуждающей силы в направлении выполнения полезной работы, по сравнению с величиной вынуждающей силы, действующей в направлении холостого хода.

Исследование направлено на создание, в конечном итоге, асимметричной по величине сум-

марной вынуждающей силы. При этом, коэффициент асимметрии величины суммарной вынуждающей силы составляет $k_{ac} = \frac{0,877}{0,49} = 1,79$. За счёт выбора рациональных параметров, в частности, соотношения статических моментов, можно достичь величины коэффициента асимметрии равного двум.

Таким образом, использование вибрационного устройства с асимметричной вынуждающей силой позволяет существенно повысить величину усилия, действующего в направлении выполнения полезной работы малогабаритного одновальцового дорожного катка, а также повысить эффективность уплотнения при меньшей его массе. К примеру, техническое решение [25] позволяет достигать величины вынуждающей силы вибрационного устройства с коэффициентом асимметрии $k_{ac} = 3$, рис. 14.

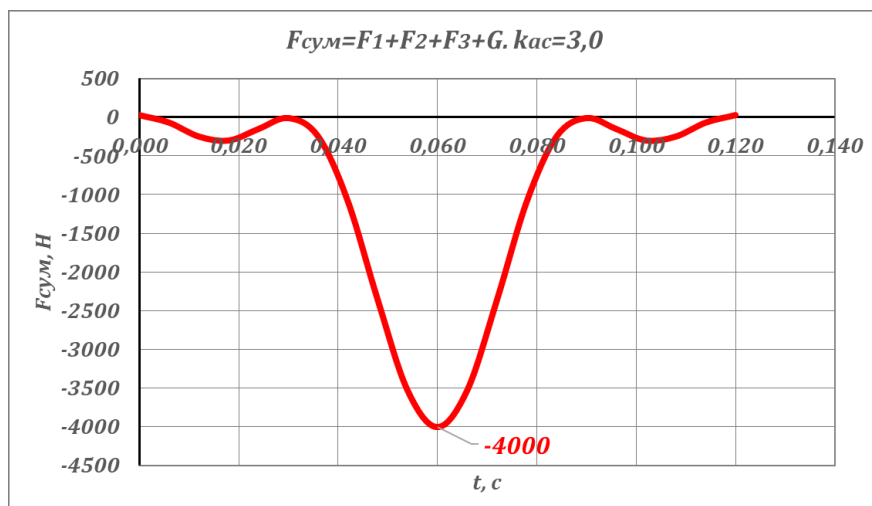


Рис. 14. График соотношения величины суммарной вынуждающей силы, действующей в направлении выполнения полезной работы, уплотнения (вниз) и в направлении холостого хода (вверх)

В практике создания технических решений по повышению коэффициента асимметрии вынуждающей силы для одновальцового вибрационного катка может быть использованы технические решения [19].

Вывод. Проведенные исследования подтвердили актуальность и перспективность конструкций малогабаритных одновальцовых вибрационных катков. Разработанный принципиально новый закон движения рабочего оборудования на основе асимметричных колебаний позволяет значительно повысить эффективность уплотнения грунтов и асфальтобетонных покрытий, а также снизить массу катка без потери других характеристик.

Полученные результаты показывают, что использование вибрационных устройств с высоким коэффициентом асимметрии вынуждающей силы способствует созданию более производительных и экономичных машин. Предложенные решения позволяют не только улучшить эксплуатационные характеристики катков, но и снизить затраты на их производство и обслуживание.

Дальнейшее развитие темы может быть связано с проведением экспериментальных исследований по реализации асимметричных изменений в других условиях, а также с открытием вибрационных устройств с еще более устойчивыми показателями асимметрии для повышения эффективности уплотнения. Данные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих моделей катков, востребованных в условиях ограниченного пространства эксплуатации.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы «Приоритет 2030» СК-ПРП-70.02-23 от 09.01.2023 г. с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова за

счет научного проекта № МЛ-5/23 от 07.06.23 г. по теме: «Исследование и разработка конструкции составного металлорежущего инструмента с оптимизированной внутренней структурой с целью его изготовления аддитивными методами производства» при содействии Центра трансфера инновационных технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г., Кустарев Г.В., Шестопапов К.К., Герасимов М.Д. Машины для земляных работ. 2 кн. Кн. 2. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины: учебное пособие для вузов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2011. 451 с.
2. Бостанов Б.О. Разработка кинематики и динамики комбинированного вибровозбудителя дорожных катков: дис.... канд. техн. наук. Республика Казахстан Алматы, 2010. 124 С.
3. Джолдасбеков С.У., Темирбеков Е.С. Проектирование безударной дорожки вибровозбудителя дорожных катков. Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (5). С. 2143–2145.
4. Бурый Г.Г. Обоснование режимных параметров вибрационных катков с учетом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации. дисс.... канд. техн. наук. Омск. 2016. 113 с.
5. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: Монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.
6. Тюремнов И.С., Филатов И.С., Игнатъев А.А. Обзор рекомендаций производителей по ис-

пользованию вибрационных катков для уплотнения грунта // Вестник ТОГУ. 2014. № 2(33). С. 155–162.

7. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2018. 143 с.

8. Yao Y.S., Feng Z.X., Li Y.W. Study on double-frequency composed vibrating compaction method based on resonance and antifriction principle // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 402. Pp. 742–746. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.402.742

9. Yao Y. S., Li Y.W., Shi X., Feng Z.X. Industrial experiment on double-frequency composed vibratory roller // Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2013. Vol. 33. Pp. 101–106.

10. Yao Y., Feng Z., Chen S., Zhang Z., Zhao L., Zhao W. Design and Fabrication of a Road Roller with Double-Frequency Composed Vibration and Its Compaction Performance // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. Vol. 39. Pp. 9219–9225. DOI: 10.1007/s13369-014-1469-9

11. Герасимов М.Д., Герасимов Д.М., Любимый Н.С., Мкртычев О.В. Вибрационные устройства с асимметричными колебаниями: монография: 2 ч. // Белгород: Изд-во БГТУ. 2024. Ч. 2. 230 С.

12. Дубков В.В., Базинская А.М. Определение параметров осцилляторно-вибрационного катка // Вестник СибАДИ. 2016. № 4 (50). С. 13–17 с.

13. Пат. 2654892, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Валец вибрационного катка / Кондаков В. Е., Оришук Р. Н.; заявл. 20.02.2017; опубл. 23.05.2018, Бюл. №15. 8 с.

14. Пат. 2681032, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Комбинированный валец вибрационного катка / Кондаков В. Е., Семенов Ю. Д.; заявл.: 14.03.2018; опубл. 01.03.2019 Бюл. № 7. 10 с.

15. Пат. 2716343, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Каток-трамбовка / Кузин Н. И.; заявл.: 23.07.2019; опубл. 11.03.2020 Бюл. № 8. 7 с.

16.. Пат. 2804316, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Валец дорожного катка / Головин А. А.; заявл.: 19.04.2023; опубл. 27.09.2023 Бюл. № 27. 14 с.

17. Пат. 226690, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Валец дорожного катка / Савельев С. В., Литовченко Р. Е.; заявл.: 29.01.2024; опубл. 18.06.2024 Бюл. № 17. 10 с.

18. Пат. 151654, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Осцилляторный валец дорожного катка с изменяемой величиной крутильных колебаний / Серебренников В. С., Мухин Р. Ю.; заявл.: 20.05.2014; опубл. 27.09.2014 Бюл. № 27. 5 с.

19. Пат. 2151837, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Вибрационный валец катка / Лещинский А.В., Иванченко С.Н., Сидорков В.В.; заявл.: 9.10.1998; опубл. 27.06.2000 Бюл. № 18. 7 с.

20. Пат. 181993, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Валец вибрационного катка / Кондаков В. Е.; заявл.: 01.03.2018; опубл. 31.07.2018 Бюл. № 22. 7 с.

21. Пат. 2746773, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Вибрационный валец дорожного катка / Шишкин Е. А.; заявл.: 06.10.2020; опубл. 20.04.2021 Бюл. № 11. 8 с.

22. Пат. 9402706, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Вибратор / Хайруллин И.Х., Хайруллин Т.И., Скуратов С.П.; заявл.: 22.07.1994; опубл. 20.05.1996 Бюл. № 13. 6 с.

23. Пат. 2292960, Российская Федерация, МПК E01C 19/28. Электромеханический вибратор / Ахунов Т. А., Макаров Л.Н., Шаршунов Ю. Е., Чебурахин И. М.; заявл.: 11.01.2005; опубл. 10.02.2007 Бюл. № 4. 6 с.

24. Пат. 2091183, Российская Федерация, МПК B06B 1/04. Способ реализации электромагнитным приводом асимметричного вибрационного движения колебательной механической системы / Крейнин Г.В., Мацеевич Б.В., Михайлов В.Д., Сериков В.В., Ушанков А.Е., Ямбулатов Р.И.; заявл.: 06.06.1995; опубл. 27.09.1997 Бюл. № 6. 10 с.

25. Пат. 2806379, Российская Федерация, МПК B06B 1/04. Полигармоническое вибрационное устройство / Герасимов М. Д., Тихонов А. А., Рязанцев В. Г., Любимый Н. С., Анциферов С. И.; заявл.: 22.03.2023; опубл. 31.10.2023 Бюл. № 31. 10 с.

Информация об авторах

Герасимов Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: mail_mihail@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Любимый Николай Сергеевич кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nslubim@bk.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Латышев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Начертательная геометрия и графика». E-mail: lat.sergej@gmail.com Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Маслов Александр Сергеевич, генеральный директор ООО «ПромДеталь», г. Шебекин, Ржевское шоссе, дом. 11.

Кислицын Александр Евгеньевич, аспирант. E-mail: sanek_kisl@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Четвериков Борис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин. E-mail: await_rescue@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 28.10.2024 г.

© Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Латышев С.С., Маслов А.С., Кислицын А.Е., Четвериков Б.С., 2025

¹Gerasimov M.D., ^{1,*}Lyubimyi N.S., ¹Latyshev S.S.,

²Maslov A.S., ¹Kislitsyn A.E., ¹Chetverikov B.S.

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

²LLC "PromDetal"

*E-mail: nslubim@bk.ru

ANALYSIS AND PROSPECTS OF DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF SMALL-SIZED SINGLE-SHAFT VIBRATORY ROLLERS

Abstract. The object of the study is small-sized single-drum vibratory road rollers required for compaction of soils and asphalt concrete pavements in confined spaces, including urban development, access roads and pedestrian areas. The relevance of the work determined the need to improve the efficiency of road equipment in the context of increasing requirements for quality and speed of construction, as well as taking into account the emergence of modern technologies and materials. The research methods include the analysis of open sources, patent documentation, as well as the development of a calculation module in the MS Excel environment for designing the optimal parameters of vibration systems. The main scientific results consist in the development of a fundamentally new law of motion of the working process based on asymmetric oscillations, which improves compaction performance while reducing the mass of the roller. In addition, the work presents recommendations for the use of new vibration devices with a high asymmetry coefficient, which opens up prospects for their widespread development. The results obtained make it possible to create more efficient and economical designs of road rollers for use in various operating conditions. The article examines the laws of change of force impact on the working equipment of a small-sized single-drum roller – a drum, and proposes a fundamentally new version of the ideal law of oscillations generated by a vibration device.

Key words: roller, road, vibratory, small-sized, single-shaft, driving force, vibration parameters, law of motion of working equipment.

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Glagolev S.N., Danilov R.G., Kustarev G.V., Shestopalov K.K., Gerasimov M.D. Earthmoving Machines. 2 Books. Book 2. Loading, Unloading and Compacting Machines: A Textbook for Universities [Mashiny dlya zemlyanyh rabot. 2 kn. Kn. 2. Pogruzочно-razguzоchnnye i uplotnyayushchie mashiny: uchebnoe posobie dlya vuzov]. Belgorod: BSTU: 2016 451 p. (rus)
2. Bostanov B.O. Development of kinematics and dynamics of a combined vibration exciter for road rollers [Razrabotka kinematiki i dinamiki kombinirovannogo vibrovzbuditelya dorozhnyh katkov]. Diss. for the academic degree of Candidate of Sciences. tech. Sciences. Republic of Kazakhstan Almaty, 2010. 124 p. (rus)
3. Dzholdasbekov S.U., Temirbekov E.S. Design of a shockless track for a vibration exciter for road rollers. Fundamental problems of theoretical and applied mechanics [Proektirovanie bezudarnoj dorozhki vibrovzbuditelya dorozhnyh katkov. Fundamental'nye problemy teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki]. Bulletin of Nizhny Novgorod University named after. N.I. Lobachevsky. 2011. No. 4 (5). Pp. 2143–2145 (rus)
4. Bury G.G. Justification of operating parameters of vibrating rollers taking into account the mass of compacted soil in the zone of active vibration [Obosnovanie rezhimnyh parametrov vibracionnyh

katkov s uchetom massy uplotnyaemogo grunta v zone aktivnogo dejstviya vibracii]. Diss. for the academic degree of Candidate of Sciences. tech. Sciences. Omsk. 2016. (rus)

5. Tyuremnov I.S., Ignatiev A.A. Soil compaction with vibrating rollers: Monograph [Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami: Monografiya.]. Yaroslavl: YaGTU Publishing House, 2012. 140 p. (rus)

6. Tyuremnov I.S., Filatov I.S., Ignatiev A.A. Review of manufacturers' recommendations for the use of vibrating rollers for soil compaction [Obzor rekomendacij proizvoditelej po ispol'zovaniyu vibracionnyh katkov dlya uplotneniya grunta]. Vestnik TOGU. 2014. No. 2(33). Pp. 155–162. (rus)

7. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Soil compaction with vibrating plates: monograph [Uplotnenie gruntov vibracionnymi plitami: monografiya.]. Yaroslavl: YAGTU Publishing House, 2018. 143 p. (rus)

8. Yao Y.S., Feng Z.X., Li Y.W. Study on double-frequency composed vibrating compaction method based on resonance and antifriction principle. Advanced Materials Research. 2011. Vol. 402. Pp. 742–746. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.402.742

9. Yao Y. S., Li Y.W., Shi, X., Feng, Z.X. Industrial experiment on double-frequency composed vibratory roller. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition). 2013. Vol. 33. Pp. 101–106.

10. Yao Y., Feng Z., Chen S., Zhang Z., Zhao L., Zhao W. Design and Fabrication of a Road Roller with Double-Frequency Composed Vibration and Its Compaction Performance. Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. Vol. 39. Pp. 9219–9225. DOI: 10.1007/s13369-014-1469-9

11. Gerasimov M.D., Gerasimov D.M., Lyubimy N.S., Mkrtichev O.V. Vibration devices with asymmetric oscillations: monograph: 2 parts [Vi-

bracionnye ustrojstva s asimetrichnymi kolebaniyami: monografiya: 2 ch.]. Belgorod: BSTU Publishing House, 2024. Part 2. 230 p. (rus)

12. Dubkov V.V., Bazinskaya A.M. Determination of parameters of an oscillatory-vibration roller. [Opredelenie parametrov oscillyatorno-vibracionnogo katka] SibADI Bulletin, No. 4 (50). 2016. Pp. 13 – 17. (rus)

13. Kondakov V.E., Orishchuk R.N. Vibratory roller drum. Patent RF. 2654892, 2018.

14. Kondakov V.E., Semenov Yu. D. Combined vibratory roller drum. Patent RF. 2681032, 2019.

15. Kuzin N.I. Compactor roller. Patent RF. 2716343, 2020.

16. Golovnin A.A. Road roller drum. Patent RF. 226690, 2024.

17. Savelyev S.V., Litovchenko R.E. Road roller drum. Patent RF. 2804316, 2023.

18. Serebrennikov V.S., Mukhin R.Yu. Oscillatory drum of a road roller with variable torsional vibrations. Patent RF. 151654, 2014.

19. Leshchinsky A.V., Ivanchenko S.N., Sidorkov V.V. Vibrating roller roller. Patent RF. 2151837, 2020.

20. Kondakov V.E. Vibratory roller drum. Patent RF. 181993, 2018.

21. Shishkin E.A. Vibrating drum of a road roller. Patent RF. 2746773, 2020.

22. Khairullin I.Kh., Khairullin T.I., Skuratov S.P. Vibrator. Patent RF. 9402706, 2020.

23. Akhunov T.A., Makarov L.N., Sharshunov Yu.E., Cheburakhin I.M. Electromechanical vibrator. Patent RF. 2292960, 2007.

24. Kreinin G.V., Matseevich B.V., Mikhailov V.D., Serikov V.V., Ushankov A.E., Yanbulatov R.I. A method for implementing asymmetric vibration motion of an oscillatory mechanical system using an electromagnetic drive. Patent RF. 2091183, 1997.

25. Gerasimov M.D., Tikhonov A.A., Ryzantsev V.G., Lyubimy N.S. Polyharmonic vibration device. Patent RF. 2806379, 2023.

Information about the authors

Gerasimov, Mikhail D. Candidate of technical sciences, associate professor of the department of hoisting and transport and road machines. E-mail: mail_mihail@mail.ru Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lyubimy, Nikolay S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hoisting and Transport and Road Machines. E-mail: nslubim@bk.ru Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Latyshev, Sergey S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Graphics. E-mail: lat.sergej@gmail.com Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

Maslov, Alexander S. General Director of «PromDetal LLC», Shebekino, Rzhenskoe highway, building. eleven.

Kislitsyn, Alexander E. Graduate student. E-mail: sanek_kisl@mail.ru Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chetverikov, Boris S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hoisting and Transport and Road Machines. E-mail: await_rescue@mail.ru Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 28.10.2024

Для цитирования:

Герасимов М.Д., Любимый Н.С., Латышев С.С., Маслов А.С., Кислицын А.Е., Четвериков Б.С. Анализ и перспективы направлений совершенствования малогабаритных одновальных вибрационных катков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 92–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-92-108

For citation:

Gerasimov M.D., Lyubimyi N.S., Latyshev S.S., Maslov A.S., Kislitsyn A.E., Chetverikov B.S. Analysis and prospects of directions of improvement of small-sized single-shaft vibratory rollers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 92–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-92-108

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-109-117

Вагазова Д.Д., Орефьева К.К., Тляшева Р.Р.Уфимский государственный нефтяной технический университет,***E-mail: kasintsevadaria@mail.ru*

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА В ПРОЦЕССЕ РУЛОНИРОВАНИЯ

Аннотация. Изготовление резервуаров методом рулонирования представляет собой один из передовых промышленных способов, позволяющий значительно сократить время монтажа. При этом стенки, днище и крыша резервуара поставляются на строительную площадку в виде рулонов, что минимизирует объём сварочных работ на месте и повышает качество сварных швов благодаря заводской двусторонней автоматической сварке. Однако, наличие большого количества сварных швов, особенно в случае габаритных резервуаров, может привести к концентрации напряжений, что повышает риск развития дефектов и аварий.

Процесс рулонирования, сопровождающийся многократным упругопластическим деформированием, оказывает значительное воздействие на стенки ёмкости, особенно в местах сварных соединений. Классический расчёт такого влияния на стенки резервуара затруднён, поэтому для исследования используются цифровые модели. В данной статье представлено моделирование напряжённо-деформированного состояния стенки резервуара с учётом процесса рулонирования, проведённое на образце обечайки размером 405х300х2мм из стали марки Ст3сп. Выбор стали Ст3сп, являющейся широко распространённой конструкционной углеродистой сталью, обусловлен ее свойствами, подходящими для условий эксплуатации резервуара, такими как расчетное давление, температура, химическая среда и коррозионная стойкость. Исследование сосредоточено на определении характеристик напряженно-деформированного состояния стенки резервуара, возникающих в результате процесса рулонирования, что имеет важное значение для обеспечения безопасной и эффективной работы резервуара на протяжении всего его срока службы.

Получены результаты напряженно-деформированного состояния стенки резервуара в процессе рулонирования, которые указывают на важность учета остаточных напряжений при расчете остаточного ресурса резервуара.

Ключевые слова: резервуар, рулонирование, ABAQUS, метод конечных элементов, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Вертикальные стальные резервуары (РВС) являются незаменимыми элементами в цепочке хранения и распределения различных жидкостей, включая нефть, нефтепродукты, химические вещества. Их роль в современных промышленных и коммерческих процессах трудно переоценить, так как они обеспечивают как безопасность, так и эффективное управление запасами.

Различные категории жидкостей требуют специализированных вертикальных резервуаров, которые предназначены для работы в определённых условиях. Существует множество разновидностей таких резервуаров:

- вертикальные цилиндрические резервуары с фиксированной крышей – это резервуар, имеющий прочную конструкцию. Данные резервуары устанавливаются на опасных производственных объектах для хранения легковоспламеняющихся жидкостей. Объём таких резервуаров может варьироваться от нескольких сотен до двадцати тысяч кубических метров для легковоспламеняющихся веществ и до пятидесяти тысяч кубических метров для газов. Такие резервуары могут

быть сделаны из коррозионно-стойких материалов, что увеличивает их срок службы.

- резервуары с плавающей крышей представляют собой конструкции, у которых крыша "плавает" на поверхности сохраняемой жидкости. Существенное уменьшение риска формирования взрывоопасной атмосферы и снижение объёмов испарения обеспечиваются данным конструктивным решением. Вместимость таких резервуаров может достигать ста двадцати тысяч кубических метров. Они идеально подходят для хранения нефти и тяжёлых нефтяных продуктов, что делает их популярными в нефтедобывающей промышленности.

Каждый вертикальный резервуар состоит из нескольких ключевых компонентов. Такие как:

- днище, которое производится из толстых металлов (до 8 мм) и формируется в виде конусообразной или плоской поверхности. Днище размещается на специальном фундаменте, который часто состоит из песчаной подушки с уклоном для предотвращения скопления воды. Это также обеспечивает равномерное распределение нагрузки.

– корпус – это основная часть резервуара, которая может иметь несколько поясов. Каждый пояс состоит из стальных листов, которые могут быть различной толщины. Чаще всего они имеют одинаковую толщину, но для повышения прочности нижние пояса могут быть усилены, так как они испытывают наибольшее давление.

– крыша, в зависимости от типа резервуара, может быть плоской, конической или сферической. Плоские и конические крыши зачастую рассчитаны на внутреннее давление до 2000 Па и вакуум до 250 Па. Сферические крыши могут выдерживать более высокие давления (до 0,02 МПа) и вакуум (до 0,002 МПа), что делает их предпочтительными в некоторых областях.

В Российской Федерации активно применяется индустриальный метод строительства резервуаров, который приводит к преобладанию рулонных конструкций в отечественном резервуарном парке. Долговечность эксплуатации ряда резервуаров, которая может достигать 30 лет, подтверждает высокую надежность и эффективность выбранного подхода к строительству металлоконструкций. Этот аспект играет ключевую роль в обеспечении стабильной работы объектов хранения, а также в минимизации затрат на их обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации.

Для обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации резервуаров, имеющих класс повышенной опасности, проводится регулярная техническая диагностика, которая позволяет выявить дефекты, способные повлиять на целостность резервуара [1–3]. В случае обнаружения дефектов проводится ремонт или модернизация.

Среди наиболее распространенных дефектов рулонных резервуаров: неровные стыки, отклонения от вертикали, вмятины, нестандартные элементы конструкции.

Индустриальный метод предусматривает изготовление плоских полотнищ стенки резервуара на заводе с последующим сворачиванием в рулон. Процесс сворачивания полотнища вызывает его изгиб, который можно интерпретировать как изгиб упругопластического материала. Относительная деформация зависит от радиуса изгиба, который определяется радиусом барабана, на который наматывается полотнище. Многократные упругопластические деформации, возникающие при сворачивании и развёртывании, особенно заметны вблизи сварных швов из-за неоднородности материала.

Главным недостатком технологии рулонирования является предрасположенность к возникновению различных дефектов, которые могут значительно повлиять на эксплуатационные характеристики резервуара. Особенно критичной

эта проблема становится при низких температурах, как в процессе строительства, так и в ходе эксплуатации. Наличие дефектов может привести к локальной потере герметичности, что в худшем случае может закончиться разрушением резервуара. Пластическая деформация стенки во время развёртывания рулона и монтажа также существенно ухудшает свойства металла, особенно после длительного старения, что дополнительно ставит под угрозу безопасность и надежность конструкции.

Основная несущая конструкция вертикальных цилиндрических резервуаров – цилиндрическая стенка, собранная из отдельных листов. Эти листы располагаются так, что их длинные стороны находятся в горизонтальном положении, образуя горизонтальные ряды, которые называют поясами. Чтобы обеспечить надёжность конструкции и устойчивость к гидростатическому давлению, толщина поясов, определяемая расчетами, увеличивается от верхних уровней к нижним [4–6]. Листы в рамках каждого пояса соединяются встык, что способствует прочности соединения и минимизации возможных утечек. Между собой пояса могут соединяться как встык, так и внахлест – выбор метода соединения зависит от проектных решений и эксплуатационных требований. Это важно для обеспечения целостности конструкции и герметичности резервуара, особенно на участках, подверженных большому гидростатическому давлению. Надлежащая технология сборки и качественное соединение листов в поясе играют ключевую роль в прочности и долговечности резервуара в целом.

Недавно широкое применение получили «зубчатые» стыки, которые повышают качество сварных соединений, сокращают сроки строительства и снижают стоимость. Однако, несмотря на преимущества, систематические исследования механических свойств сварных швов после рулонирования не проводились.

Вертикальные стальные резервуары подвергаются различным деформациям на протяжении всего своего жизненного цикла, начиная с этапа производства. Это делает прогнозирование срока их эксплуатации сложной задачей.

Несмотря на многочисленные исследования, проблемы повреждений рулонных резервуаров и их влияние на эксплуатационные свойства остаются актуальными.

В настоящее время для оценки напряжённо-деформированного состояния резервуаров используется безмоментная теория, которая учитывает только кольцевые и меридиональные напряжения. Это ограничивает возможность получить полную картину распределения напряжений в конструкции.

Теория моделирования, подобия и размерностей широко изучается в научной литературе, но продолжает развиваться в современных исследованиях.

Моделирование основывается на принципе подобия, который представляет собой полную математическую аналогию между системами, при которой сохраняется пропорциональность между сходственными переменными. Из-за значительных размеров промышленных резервуаров их изучение и создание цифровых моделей затруднено [7].

Цель исследования – моделирование напряжённо-деформированного состояния стенки резервуара вовремя рулонирования, для получения более полного представления о распределении напряжений и прогнозирования потенциальных повреждений.

Материалы и методы. Для исследования была выбрана стенка резервуара, изготовленная из стали марки СтЗсп. Эта сталь широко применяется в нефтегазовой промышленности благодаря сочетанию прочности и пластичности. Сталь СтЗсп относится к углеродистым конструкционным сталям обыкновенного качества.

Основным компонентом стали является феррит. Для повышения прочности и пластичности в состав стали добавляют углерод, а также примеси, такие как сера, мышьяк, фосфор, медь, хром, марганец, никель и кремний. Содержание фосфора и серы влияет на пластичность и прочность стали. Точный химический состав и технология производства стали СтЗсп определяются необходимыми физическими и химическими свойствами.

Сталь СтЗсп обладает хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью. Она относится к нефлокеночувствительным сталям, то есть не подвержена отпускной хрупкости. Для улучшения свойств стали без изменения её химического состава применяют термическую обработку, которая включает нагрев и последующее охлаждение в жидкой среде. Такая обработка позволяет повысить срок службы изделия, изменить его массу или размеры. Во время термической обработки изменяются механические свойства стали, которая в горячем состоянии легко принимает необходимую форму. Механические характеристики стали СтЗсп представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства СтЗсп

Класс стали	Марка стали	ГОСТ	Механические свойства				
			Е, МПа	σв, МПа	εв	σт, МПа	εт
C255	СтЗсп	14637-89	2,1·10 ⁵	370	0,26	245	0,0032

Прогнозирование срока службы резервуаров проводится как на этапе проектирования, так и во время эксплуатации, следуя требованиям нормативных документов, включая ГОСТ. На стадии проектирования ресурс резервуара определяется выбором оптимальной конструкции и материалов [8].

В процессе эксплуатации резервуар подвергается сложным нагрузкам, обусловленным конструктивными особенностями и внешними факторами (осадка грунта, снеговая нагрузка и др.). Для обеспечения долговечности проводятся периодические диагностические исследования, позволяющие оценить техническое состояние и определить возможность дальнейшей эксплуатации или необходимости ремонта [9-11]. Такой метод диагностического исследования относят к традиционным методам оценки остаточного ресурса.

Во время диагностики резервуар проходит:

- визуальный осмотр стенки, кровли и днища;
- измерение толщины стенки, днища и кровли;
- контроль сварных швов физическим методом;
- механические испытания.

А также для полного сбора информации проводят расчет остаточного ресурса по скорости коррозионного износа, расчет остаточного ресурса по критериям малоциклового усталости.

По итогу на основании полученных результатов технического осмотра и расчетов резервуара составляется заключение, в котором описываются результаты технического осмотра и рекомендации по дальнейшей эксплуатации и ограничения по уровню наполнения. Такой метод диагностического исследования относят к традиционным методам оценки остаточного ресурса.

Традиционные методы оценки остаточного ресурса действительно обладают рядом положительных характеристик, таких как простота расчетов и приемлемая точность результатов. Эти методы обычно основываются на стандартных формулах и процедурах, что позволяет оперативно производить необходимые вычисления, используя доступные данные о состоянии резервуара. При правильном использовании таких методик можно получить достоверную информацию остаточного ресурса.

Один из главных недостатков традиционных методов – это то, что они не учитывают локальные повреждения, неспособность отразить не-

равномерное распределение коррозии или других дефектов. Это может привести к ошибкам при анализе остаточного ресурса резервуара. Поэтому при использовании традиционных методов важно быть очень осторожным и проверять наличие любых подозрительных дефектов [12–15].

ABAQUS – это программа, которая помогает рассчитывать прочность разных конструкций. Она очень популярна в нефтегазовой и нефтехимической отраслях, и используется многими известными компаниями, такими как Shell, BP и Exxon Mobil.

Программа позволяет моделировать, как конструкции ведут себя под разными нагрузками, включая высокие температуры и внешние физические воздействия. Одно из главных её преимуществ – возможность использовать различные модели материалов. Что способствует получить достоверные результаты при расчётах и построении цифровых моделях.

ABAQUS – это мощный инструмент для исследований оборудования нефти и газа, который помогает сделать конструкции более безопасными и эффективными.

Основная часть. В процессе сворачивания полотнища, изначально плоское, подвергается изгибу. Изгиб полотнища при сворачивании можно рассматривать с достаточной степенью точности как чистый изгиб стержня из идеально упругопластического материала с сохранением гипотезы плоских сечений при упругопластическом изгибе [16]. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотнища в процессе рулонирования. При сворачивании полотнища в рулон относительная деформация крайних волокон определяется радиусом изгиба. Радиус изгиба полотнища определяется радиусом барабана, на который наматывается полотнище. Рассмотрим участок полотнища, подвергаемого сворачиванию. Процесс сворачивания полотнища в рулон будем рассматривать как чистый изгиб (рис. 1).

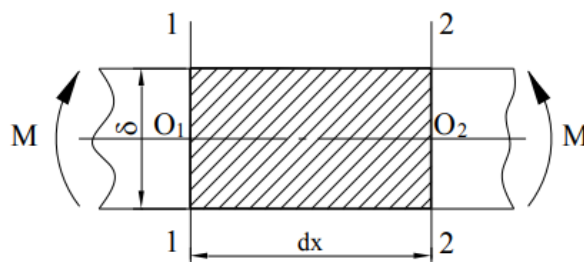


Рис. 1. Участок полотнища, подвергается сворачиванию

1-1, 2-2 – бесконечно близкие друг к другу сечения, O_1O_2 – отрезок, принадлежащий нейтральному слою, δ – толщина полотнища, M – изгибающий момент

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние полотнища, свернутого в рулон радиуса $R_{св}$. Для простоты примем толщину полотнища постоянной (δ). $d\alpha$ – угол между бесконечно близкими сечениями 1-1 и 2-2 свернутого в рулон полотнища. z – расстояние от нейтрального слоя до рассматриваемого волокна. AB – удлиненное волокно при изгибе.

Таким образом, имеем:

$$O_1O_2 = dx = \rho d\alpha,$$

$$AB = (R_{св} + z)d\alpha.$$

Абсолютное удлинение волокна:

$$\Delta l = (R_{св} + z)d\alpha - R_{св}d\alpha = zd\alpha \quad (1)$$

Относительное удлинение волокна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{zd\alpha}{R_{св}d\alpha} = \frac{z}{R_{св}} \quad (2)$$

Следовательно, относительная деформация крайних волокон полотнища при сворачивании равна:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{2R_{св}} \quad (3)$$

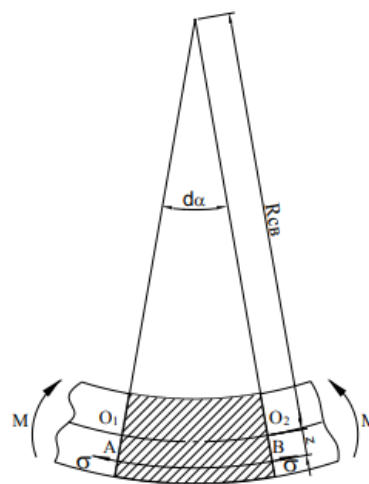


Рис. 2. Участок полотнища, свернутый в рулон радиуса ρ

Напряжение по толщине полотнища распределяются по линейному закону:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{Ez}{R_{св}} \quad (4)$$

Для исследования распределения напряженно-деформированного состояния стенки резервуара было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе

ABAQUS. В качестве модели полотна резервуара выбран лист стали марки СтЗсп размером 405×300×2 мм. Диаметр каркаса равен 50 мм.

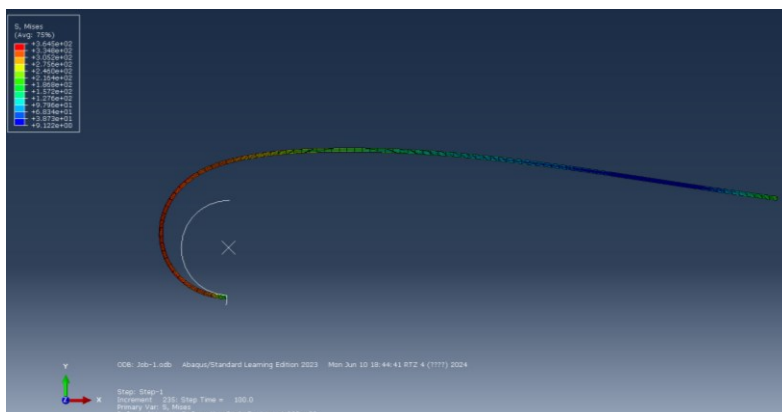


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу

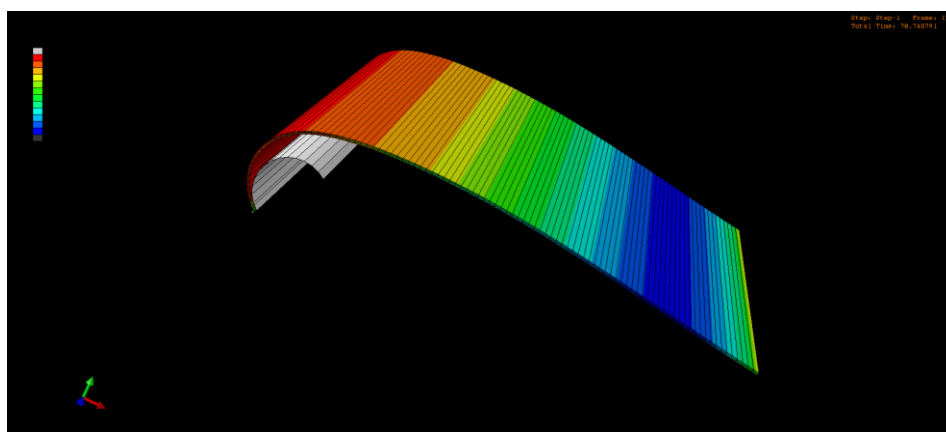


Рис. 4. Распределение напряжений по Мизесу

На представленных рисунках 3, 4 наглядно показаны основные и эквивалентные напряжения, возникающие в пластине в процессе рулонирования. Напряжения в процессе рулонирования достигают 334,1 МПа. Это приводит к возникновению остаточных упругих и пластических деформаций в стенке полотна.

После освобождения полотна, свернутого в рулон, от удерживающих планок рулон переходит в свободное состояние, при этом листы, толщина которых не превышает величины упругой зоны, распрямятся.

Таким образом, НДС полотна после снятия удерживающих конструкций в свернутом состоянии определяется состоянием свернутого рулона, т.е. рассмотренные технологические операции необходимо моделировать последовательно в соответствии с реальной последовательностью технологических процессов.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что для расчёта напряжённо-деформированного состояния корпуса вертикального резервуара необходимо учитывать напряжения, возникающие в процессе рулонирования. Это даст возможность более точно определить напряжения и перемещения в конструкции резервуара, что очень важно для его надёжности и долговечности в процессе эксплуатации.

Выводы. На основе разработанной модели поведения стенки резервуара в программном комплексе ABAQUS было проведено исследование распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе рулонирования.

Получены напряжения, возникающие в полотне в процессе рулонирования, которые необходимо учитывать при расчёте напряжённо-деформированного состояния резервуара. Это

дает возможность более точно определить напряжения и перемещения в конструкции резервуара, что очень важно для его надёжности и долговечности в процессе эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахманова К.Н., Тляшева Р.Р., Шерматов Д.Н., Кадыров Р.О., Гафарова В.А., Гимаев Р.А. Верификация цифровой модели нагружением оболочки внутренним давлением до разрушения // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2022. № 2. С. 5–19. DOI: 10.17122/ogbus-2022-2-5-19. EDN XRMABY.
2. Насибуллина О.А., Тляшева Р.Р., Касинцева Д.Д. Повышение точности изготовления сварных корпусов аппаратов для обеспечения наилучшего теплообмена // Нефтегазовое дело. 2022. Т. 20. № 2. С. 148–154. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-2-148-154. EDN DGKNMI.
3. Каримов Р. Ф., Баязитов М. И. Обеспечение прочности РВС-10000 на основе численного моделирования корректировки окраек днища в процессе монтажа // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 7(121). С. 26–29.
4. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Разработка алгоритма создания цифрового двойника сварного соединения оболочковой конструкции (часть 1) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 5. С. 198–211. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-5-198-211. EDN EAQRGH.
5. Каравайченко М.Г. Прочность и живучесть резервуаров. М.: Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2023. 524 с.
6. Баязитов М.И., Бердин В.К., Кузеев И.Р., Тляшева Р.Р. Оценка напряженно-деформированного состояния вертикальных резервуаров с нефтепродуктами с учетом внештатных ситуаций // Нефтегазовое дело. 2022. № 4. С. 21–45. DOI: 10.17122/ogbus-2022-4-21-45. EDNFUTGWC.
7. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О., Неганов Д.А. Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций // Чебышевский сборник. 2017. Т. 18, № 3 (63). С. 394–416. DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416. EDNUXBEKD.
8. Гафарова В.А., Шерматов Д.Н., Баязитов М.И., Арсланов А.Л. Изменение распределения магнитных характеристик в стальной оболочковой конструкции в результате формирования сварного соединения (часть 2) // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21. № 6. С. 252–263. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-252-263. EDN XGFOVS.
9. Баязитов М.И., Нугаев И.К. Совершенствование мониторинга надежности, определение основных целей технического обслуживания оборудования и понятий отказов // Современные технологии в нефтегазовом деле. 2021. Сборник трудов международной научно-технической конференции, Октябрьский, 26 марта 2021 года. С. 573–577.
10. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Numerical modeling of a vertical steel tank differential settlement development // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258. Pp. 60–70. DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_6. EDN IDNVIL.
11. Abdrakhmanova K.N. Possibilities of an object digital twin application in order to extend and predict safe operation resource // Science.Education. Practice: materials of the international University Science Forum, April 22, 2020. Pp. 182–186.
12. Каравайченко М. Г., Абдрафикова С. Р. Построение двухсетчатой купольной крыши резервуара // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 3. С. 273–277. DOI 10.28999/2541-9595-2019-9-3-273-277. EDN ZTNFOP.
13. Jha A.K., Arumugham S. Metallographic analysis of embedded crack in electron beam welded austenitic stainless steel chemical storage tank // Engineering Failure Analysis. 2001. Vol. 8, No. 2. Pp. 157–166.
14. Dmitrieva A.S., Samigullin G.H., Lyagova A.A. Evaluation of stress-strain state of steel cylindrical tank with crack defect using ansys software // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources - Proceedings Of The International Forum-Contest of Young Researchers, 2018 : Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers , St. Petersburg, 18–20 апреля 2018 года. St. Petersburg, 2019. Pp. 97–103.
15. Каравайченко М.Г., Васильев А.В., Галимзянов Р.И. Анализ прочности, жесткости и плавучести понтонов для вертикальных цилиндрических резервуаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. Т. 9, № 6. С. 626–632. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-6-626-632. EDNEXYASS.
16. Комаров П.А. Определение радиуса вальцовки ремонтных вставок при ремонте стальных резервуаров, изготовленных методом рулонирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. №4(36). С. 215–220.

Информация об авторах

Вагазова Дарья Дмитриевна, аспирант кафедры технологические машины и оборудование. E-mail: kasintsevadaria@mail.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д.1

Орефьева Ксения Константиновна, магистрант кафедры технологические машины и оборудование. E-mail: charmed9393@gmail.com. Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д.1

Тляшева Резеда Рафисовна, доктор технических наук, профессор кафедры технологические машины и оборудование. E-mail: rezedat@gmail.com. Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, д.1

Поступила 19.06.2024 г.

© Вагазова Д.Д., Орефьева К.К., Тляшева Р.Р., 2025

***Vagazova D.D., Orefyeva K.K., Tlyasheva R.R.**

Ufa State Petroleum Technical University

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

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE TANK WALL DURING THE ROLLING PROCESS

Abstract. *The production of tanks by rolling is one of the advanced industrial methods that significantly reduces installation time. At the same time, the walls, bottom and roof of the tank are delivered to the construction site in the form of rolls, which minimizes the amount of welding work on site and improves the quality of welds thanks to factory double-sided automatic welding. However, the presence of a large number of welds, especially in the case of oversized tanks, can lead to stress concentration, which increases the risk of defects and accidents.*

The rolling process, accompanied by repeated elastoplastic deformation, has a significant effect on the walls of the container, especially in the places of welded joints. The classical calculation of such an effect on the tank walls is difficult, so digital models are used for the study. This article presents a simulation of the stress-strain state of the tank wall, taking into account the rolling process, carried out on a 405x300x2 mm shell sample made of St3sp steel. The choice of St3sp steel, which is a widely used structural carbon steel, is due to its properties suitable for tank operating conditions, such as design pressure, temperature, chemical environment and corrosion resistance. The study focuses on identifying the characteristics of the stress-strain state of the tank wall, resulting from the rolling process, which is crucial for ensuring the safe and efficient operation of the tank throughout its entire service life.

The results of the stress-strain state of the tank wall during the rolling process are obtained, which indicate the importance of taking into account residual stresses when calculating the residual life of the tank.

Keywords: *reservoir, rolling, ABAQUS, finite element method, modeling, stress-strain state*

REFERENCES

1. Abdrakhmanova K.N., Tlyasheva R.R., Shermatov D.N., Kadyrov R.O., Gafarova V.A., Gimaev R.A. Verification of the digital model by loading the shell with internal pressure before destruction [Verifikatsiya cifrovoy modeli nagruzheniem obolochki vnutrennim davleniem do razrusheniya]. Electronic scientific journal Oil and Gas business. 2022. No. 2. Pp. 5–19. DOI: 10.17122/ogbus-2022-2-5-19. EDN XRMABY. (rus)
2. Nasibullina O.A., Tlyasheva R.R., Kasintseva D.D. Improving the accuracy of manufacturing welded apparatus housings to ensure the best heat transfer [Povyshenie tochnosti izgotovleniya svarnyh korpusov apparatov dlya

obespecheniya nailuchshego teploobmena]. Oil and gas business. 2022. Vol. 20. No. 2. Pp. 148–154. DOI 10.17122/ngdelo-2022-2-148-154. EDN DGKNMI.(rus)

3. Karimov R.F., Bayazitov M.I. Ensuring the strength of the RVS-10000 based on numerical modeling of the correction of the bottom edges during installation [Obespechenie prochnosti RVS-10000 na osnove chislennogo modelirovaniya korrektyrovki okraek dnishcha v processe montazha]. Science and business: ways of development. 2021. No. 7(121). Pp. 26–29.(rus)

4. Gafarova V.A., Shermatov D.N., Bayazitov M.I., Arslanov A.L. Development of an algorithm for creating a digital double of a welded joint of a shell structure (part 1) [Razrabotka algoritma sozdaniya cifrovogo dvojnika svarnogo soedineniya

obolochkovoj konstrukcii (chast' 1)] . Oil and gas business. 2023. Vol. 21, No. 5. Pp. 198–211. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-5-198-211. EDN EAQRGH.(rus)

5. Karavaichenko M.G. Strength and survivability of reservoirs[Prochnost' i zhivuchest' rezervuarov]. Moscow: St. Petersburg: High-tech technologies, 2023. 524 p. (rus)

6. Bayazitov M.I., Berdin V.K., Kuzeev I.R., Tlyasheva R.R. Assessment of the stress-strain state of vertical reservoirs with petroleum products, taking into account emergency situations [Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vertikal'nyh rezervuarov s nefteproduktami s uchetom vneshtatnyh situacij]. Oil and gas business. 2022. No. 4. Pp. 21–45. DOI: 10.17122/ogbus-2022-4-21-45. EDN FUTGWC.(rus)

7. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Reznikov D.O., Neganov D.A. Analysis of stress-strain and limit states in extremely loaded zones of machines and structures [Analiz napryazhenno-deformirovannyh i predel'nyh sostoyanij v ekstremal'no nagruzhennyh zonah mashin i konstrukcij]. Chebyshevsky collection. 2017. Vol. 18, No. 3 (63). Pp. 394–416. DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-394-416. EDN UXBEKD.(rus)

8. Gafarova V.A., Shermatov D.N., Bayazitov M.I., Arslanov A.L. Change in the distribution of magnetic characteristics in a steel shell structure as a result of the formation of a welded joint (part 2) [Izmenenie raspredeleniya magnitnyh harakteristik v stal'noj obolochkovoj konstrukcii v rezul'tate formirovaniya svarnogo soedineniya (chast' 2)]. Oil and gas business. 2023. Vol. 21. No. 6. Pp. 252–263. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-252-263. EDN XGFOVS.(rus)

9. Bayazitov M.I., Nugaev I.K. Improving reliability monitoring, determining the main objectives of equipment maintenance and concepts of failures [Sovershenstvovanie monitoringa nadezhnosti, opredelenie osnovnyh celej tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya i ponyatij otkazov]. Modern technologies in oil and gas business. 2021. Proceedings of the International Scientific and Technical conference, Oktyabrsky, March 26, 2021. Pp. 573–577.(rus)

10. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Numerical modeling of a vertical steel tank

differential settlement development. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. Vol. 1258. Pp. 60–70. DOI 10.1007/978-3-030-57450-5_6. EDN IDNVIL.

11. Abdrakhmanova K.N. Possibilities of an object digital twin application in order to extend and predict safe operation resource. Science. Education. Practice: materials of the international University Science Forum, April 22, 2020. Pp. 182–186.

12. Karavaichenko M.G., Abdrafikova S.R. Construction of a double-mesh dome roof of a reservoir [Postroenie dvuhsetchatoj kupol'noj kryshi rezervuara]. Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products. 2019. Vol. 9, No. 3. Pp. 273–277. DOI 10.28999/2541-9595-2019-9-3-273-277. EDN ZTNFOP.(rus)

13. Jha A.K., Arumugham S. Metallographic analysis of embedded crack in electron beam welded austenitic stainless steel chemical storage tank. Engineering Failure Analysis. 2001. Vol. 8, No. 2. Pp. 157–166.

14. Dmitrieva A.S., Samigullin G.H., Lyagova A.A. Evaluation of stress-strain state of steel cylindrical tank with crack defect using ansys software. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources - Proceedings Of The International Forum-Contest of Young Researchers, 2018 : Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers , St. Petersburg, April 18-20, 2018. St. Petersburg, 2019. Pp. 97–103.

15. Karavaichenko M.G., Vasiliev A.V., Galimzyanov R.I. Analysis of strength, stiffness and buoyancy of pontoons for vertical cylindrical tanks [Analiz prochnosti, zhestkosti i plavuchesti pontonov dlya vertikal'nyh cilindricheskih rezervuarov]. Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products. 2019. T. 9, No. 6. Pp. 626–632. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-6-626-632. EDN EXYASS.(rus)

16. Komarov P.A. Determination of the rolling radius of repair inserts during the repair of steel tanks made by the rolling method [Opredelenie radiusa val'covki remontnyh vstavok pri remonte stal'nyh rezervuarov, izgotovlennyh metodom rulonirovaniya]. Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2012. No. 4 (36). C. 215–220.

Information about the authors

Vagazova, Daria D. Postgraduate student. E-mail: kasintsevadaria@mail.ru. Ufa State Petroleum Technical University, Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov str., 1

Orefieva, Ksenia K. Undergraduate student. E-mail: charmed9393@gmail.com. Ufa State Petroleum Technical University, Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov str., 1

Tlyasheva Rezeda R. DSc, Professor. E-mail: rezedat@gmail.com. Ufa State Petroleum Technical University, Russia, 450064, Ufa, Kosmonavtov str., 1.

Received 19.06.2024

Для цитирования:

Вагазова Д.Д., Орефьева К.К., Тляшева Р.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния стенки резервуара в процессе рулонирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 109–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-109-117

For citation:

Vagazova D.D., Orefyeva K.K., Tlyasheva R.R. Analysis of the stress-strain state of the tank wall during the rolling process. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 109–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-109-117

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-118-136

Шестакова Е.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет

E-mail: shestakova2525@yandex.ru

О РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация. В статье установлено, что актуальным направлением для восстановления заброшенных скважин и повышения нефтеотдачи старых месторождений остается создание малых каналов из обсаженной скважины с заданным радиусом кривизны по предварительно спланированной траектории. Рассмотрена информация о скважинном фрезерном инструменте для фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне и последующего бурения каналов с использованием специальных малогабаритных винтовых забойных двигателей. Проанализирована научно-техническая информация и установлено, что актуальными направлениями являются разработка новых и усовершенствование известных конструкций инструмента для фрезерования «окна» в обсадных колоннах различных групп прочности. Исследована перспектива мониторинга параметров глубинного оборудования на протяжении его использования через статистический анализ временных рядов, в том числе изменений технологических параметров фрезерования. Рассмотрена общая информация об использовании колебаний технологических параметров осевой нагрузки на фрезерный инструмент и давления промывочной жидкости во время процесса фрезерования, представленных в виде случайного процесса. Проанализированы общеизвестные критерии косвенной оценки технического состояния глубинного оборудования, определено, что при их использовании должно выполняться условие независимости. Установлено, что актуальным направлением является разработка нового критерия диагностирования работоспособного состояния для последующего создания автоматизированной системы мониторинга и оценки технического состояния оборудования, включая возможность прогнозирования подклинивания и заклинивания специального малогабаритного винтового забойного двигателя.

Ключевые слова: вторичное вскрытие пласта, фрезерование эксплуатационной колонны, винтовой забойный двигатель, фрезерный инструмент, критерий диагностирования, техническая диагностика.

Введение. В настоящее время, по оценке Министерства энергетики Российской Федерации, доля трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) в России составляет более 65 % от общего объема доказанных нефтяных запасов, при этом доля добычи ТРИЗ около 8 %, и увеличение динамики не существенно [1]. Установлено, что существует определенный порог по дебиту скважины, за которым добыча нефти становится либо технически невозможной, либо некупаемой с экономической точки зрения. Известно, что на множестве скважин добыча остановлена из-за прекращения поступления пластового флюида или в связи с высоким содержанием воды в получаемой нефтяной продукции. Неэкономичность добычи нефти на скважинах с ТРИЗ зачастую приводит к их консервации или полному закрытию, их число составляет от 25 до 30 тысяч [2]. По этой причине важным этапом разработки скважины является вторичное вскрытие, осуществляемое перфорированием, с использованием различных перфораторов (пулевых, кумулятивных, гидropескоструйных, фрезерных и торпедных разновидностей) [3]:

1) при использовании пулевых и торпедных устройств происходит детонация зарядов в специальных камерах, что приводит к выбросу пуль

или торпед с помощью взрывной энергии. Основные недостатки: имеют ограниченное применение, не всегда обеспечивают нужное пробитие из-за малой длины канала;

2) в методе кумулятивной перфорации эксплуатационная колонна подвергается действию направленной огненной струи, прожигающей отверстия в металле. Основные недостатки этого метода включают риск деформации колонны и повреждения цементного камня;

3) при гидropескоструйной перфорации используют направленную струю, но вместо газа в качестве разрушающего агента применяется вода с добавлением песка для усиления абразивных свойств. Основной недостаток: возможно возникновение блокирующей зоны продуктивного пласта, снижающей его продуктивность.

Подбор технологии перфорации скважины определяется различными характеристиками [4]:

- условиями проведения буровых работ;
- геологическими характеристиками месторождения;
- конструкцией скважины;
- техническими параметрами перфорационных устройств (тип, плотность прострела и т. д.);
- вероятными побочными эффектами и прочими факторами.

Кроме того, вторичное вскрытие может осуществляться путём бурения горизонтальных скважин и боковых стволов с горизонтальной частью, которое имеет схожие подходы [4]. Развитие технологий горизонтального бурения, активно внедряемых российскими нефтедобывающими компаниями, способствует оптимизации сети эксплуатационных скважин и, как следствие, росту доступных для разработки запасов нефти. Это приводит к снижению депрессии на пласт, повышению эффективности добычи нефти из сложных месторождений, ранее считавшихся не извлекаемыми, и увеличению результативности применения методов воздействия на нефтеносные пласты [5–7]. За последние пятнадцать лет в России наблюдается значительный рост строительства горизонтальных скважин. В настоящий момент времени происходит переход от индивидуального бурения горизонтальных скважин к систематическому применению этой технологии, что дает возможность полностью реализовать потенциал указанных выше преимуществ [6, 8].

Материалы и методы. Поиск патентной информации проводился за 2011–2023 гг. по базам данных:

1) Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный институт промышленной собственности» – [«https://new.fips.ru»](https://new.fips.ru);

2) «Яндекс. Патенты», созданные при содействии Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатента) – [«https://yandex.ru/patents»](https://yandex.ru/patents);

3) Европейского Патентного ведомства «European Patent Office» – [«https://www.epo.org»](https://www.epo.org);

4) авторских свидетельств и патентов Союза Советских Социалистических Республик «База патентов СССР» – [«https://patents.su»](https://patents.su).

Поиск научно-технической информации проводился по базам данных:

1) научной электронной библиотеки «Elibrary» – [«https://www.elibrary.ru»](https://www.elibrary.ru);

2) научной электронной библиотеки «КиберЛенинка» – [«https://cyberleninka.ru»](https://cyberleninka.ru);

3) информационно-энциклопедического проекта «Рубрикон» – [«https://www.rubricon.com»](https://www.rubricon.com).

Основная часть. Значительная часть разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений находится в поздней стадии эксплуатации, таким образом, одним из наиболее перспективных подходов является метод восстановления неэксплуатируемых скважин или повышения их производительности за счет дополнительного бурения бокового наклонного или горизонтального ствола из отфрезерованного участка обсадной

эксплуатационной колонны. Профессор Н. Ф. Кагарманов в своем исследовании истории развития горизонтального и бокового бурения [9], пришел к выводу, что традиционные способы добычи нефти, которые включают в себя вертикальное и наклонное бурение скважин с применением метода заводнения, позволяют извлечь из пласта лишь 30–50 % нефти [9]. В то же время, технология горизонтального бурения соответствует самым строгим требованиям по эффективности и безопасности для окружающей среды. Этот метод дает возможность существенно увеличить добычу нефти в 3–7 раз и повысить коэффициент ее извлечения до 70–80 %.

В истории развития бурения наклонных скважин особое место занимает турбобур. Турбобур представляет собой инновационный продукт инженеров из России, который открыл новые горизонты в области бурения нефтяных и газовых скважин, позволив достичь невиданных темпов их создания. Этот прорыв существенно увеличил объемы добычи углеводородов, что стало фундаментом для устойчивого экономического роста Советского Союза. Позднее, на смену турбобуру пришел винтовой забойный двигатель (ВЗД), разработанный и выпускаемый такими предприятиями, как Кунгурский и Павловский машиностроительные заводы, а также заводом синтетического каучука в Чайковском. В СССР и современной России именно с использованием гидравлических забойных двигателей пробурено подавляющее большинство нефтяных и газовых скважин, включая те, которые имели сложный профиль и являлись ключевыми для добычи углеводородного сырья [10–12].

Для эффективной проводки сложных странственных профилей необходимо применять специальные телеметрические системы, которые обеспечивают точное определение положения ствола скважины, изменения угла наклона и направления, а также позволяют оперативно корректировать траекторию [13, 14]. Изучение научно-технической информации показало, что эффективность бурения скважин, подверженных различным нарушениям, в значительной мере зависит от состояния и типа применяемых телеметрических и роторных систем управления [15–18]. Учитывая данные, полученные на месторождениях, до половины всех пробуренных скважин имели отклонения в технологии проводки. При проведении наклонно-направленного бурения были выявлены различные причины некорректного проводки скважин [19, 20]:

- отклонение зенитного угла, азимута;
- необоснованные корректировки направления проводки ствола скважины;

- ошибочное измерение показателей датчиками телеметрической системы;
- износ и отказ оборудования.

В связи с этим при строительстве скважин большое внимание уделяется вопросам своевременного определения технического состояния оборудования. Основными элементами компоновочной части для перфорации каналов являются ВЗД и фрезерный инструмент [21]. В процессе ликвидации аварийных ситуаций или при бурении новых боковых каналов в скважине применяются специальные фрезерные инструменты, предназначенные для обработки металла эксплуатационной колонны и цементного камня. Фрезерование стоит на первом месте среди методов для разрушения металла эксплуатационной колонны. Ключевыми различиями применения скважинного фрезерного оборудования и его режущих элементов по сравнению с инструментами для обработки металлов в машиностроении являются:

- невозможность регулярной заточки режущих элементов;
- сложность контроля состояния инструмента во время работы;

- неравномерное охлаждение режущей кромки;
- отсутствие фиксации объекта фрезерования.

От предназначения и условий работы зависят эксплуатационные и конструктивные характеристики скважинного инструмента [22], их многообразие приводит к существованию различных типоразмеров и конструкций. Определено, что условия работы скважинных фрезеров определяются в основном типом и технологией выполняемых работ, и при одинаковых условиях с увеличением глубины и уменьшением диаметра скважин качество работы инструмента значительно ухудшается [23]. На рис. 1 показана классификация фрезерного инструмента, используемого для проведения ремонтно-восстановительных работ в скважинах. Поскольку объекты фрезерования различаются по материалу, условиям залегания, расположению в скважине, геометрическим размерам и целям обработки, существующая классификация включает в себя несколько видов фрезеров.

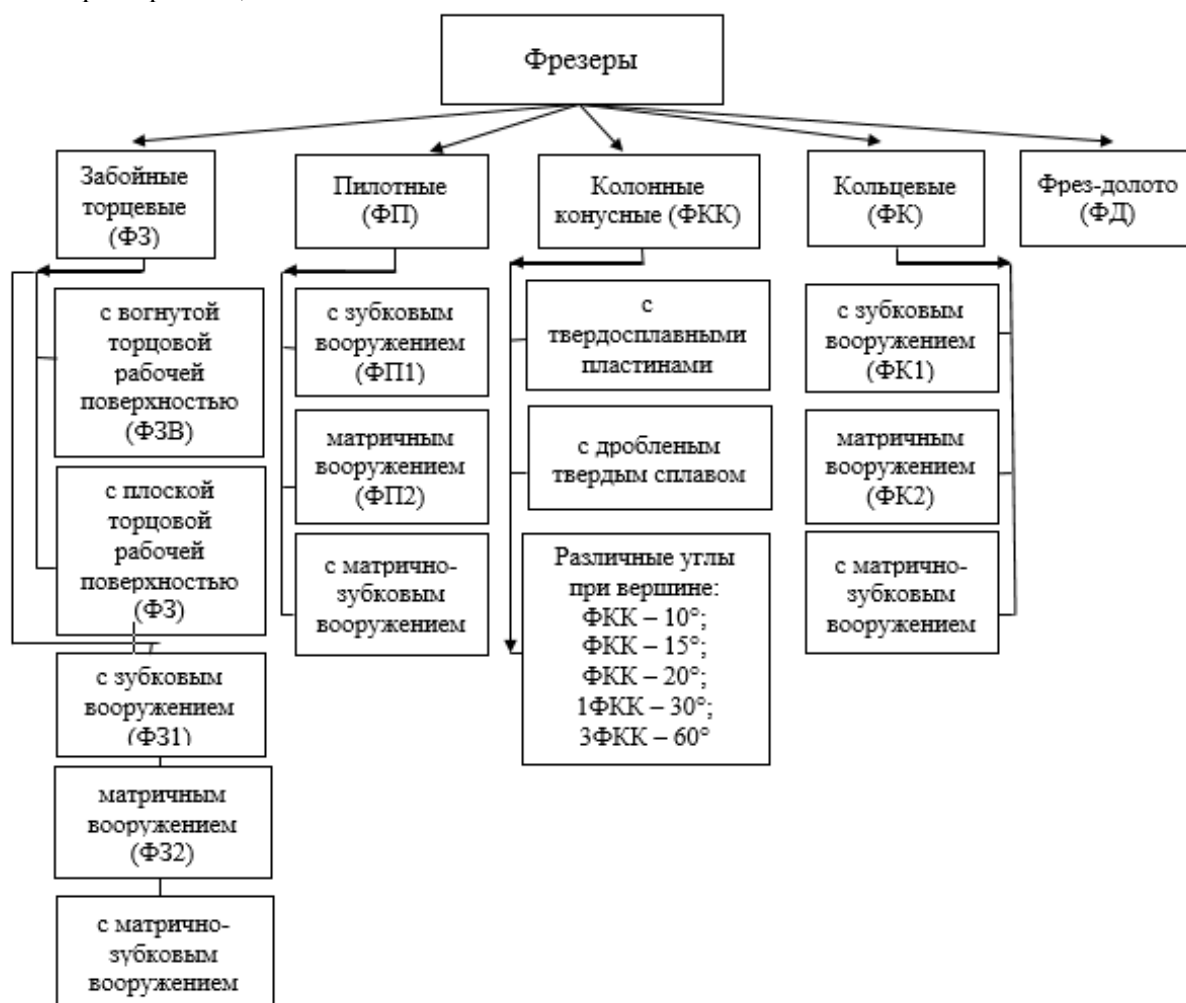


Рис. 1. Классификация фрезерного инструмента

В ходе анализа выявлено, что из-за воздействия таких факторов как: ударные нагрузки, высокие температуры, абразивные жидкости, колебания различного вида рабочая кромка фрезерного инструмента подвергается абразивному воздействию, что приводит к отказу оборудования. Учитывая, что фреза взаимодействует с цементом, песком, горной породой, частицами стружки, металлическими фрагментами и про-

чими объектами, которые накапливаются на забое и не удаляются с помощью промывочной жидкости, необходимо своевременно производить мониторинг технического состояния инструмента [24]. Установлено, что наибольшее количество патентной информации приходится на совершенствование конструкции фрезеров торцевых и конусных типов, а также их вооружения (рис. 2), составляя более 60 % от всей информации.

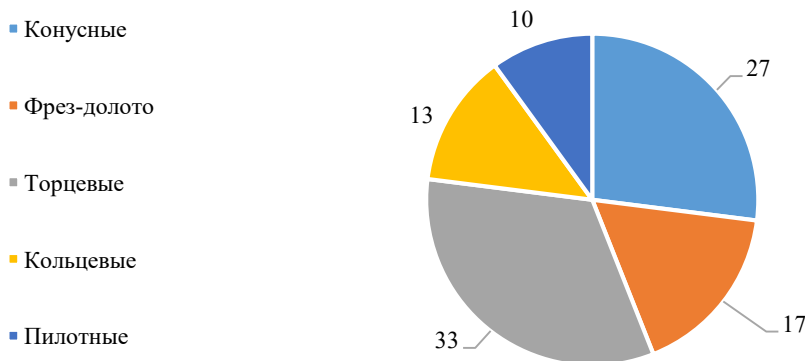


Рис. 2. Распределение патентов по типам фрезеров за период 2011–2023 гг., %

Для повышения нефтеотдачи малодебитных скважин наиболее распространенными методами создания боковых стволов из обсаженной колонны в вертикальных, наклонных, и горизонтально-наклонных скважинах являются [19, 25]

- вырезание участка эксплуатационной колонны с последующим бурением бокового ствола;

- вырезание «окна» в эксплуатационной колонне с применением клина-отклонителя и дальнейшее бурение бокового ствола.

Технологию фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне разрабатывали и рассматривали в своих трудах: Воевидко И. В., Гасанов А. П., Гилязов Р. М., Давлетбаев М.Р., Двойников М.В., Зарипов Д. Э., Кагарманов Н. Ф., Левинсон Л. М., Лягов А. В., Мухаметшин А. А., Самигуллин В. Х., Хасанов А. Ф., Хейрабади Г. С., Чудык И. И. и многие другие.

В своих трудах Воевидко И. В. и Чудык И. И. исследуют процесс фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне скважины и обосновывают математические законы, которые помогают определять силу отклонения на фрезерном инструменте и уровень искривления бокового ствола скважины [26].

В статье [27] Левинсон Л. М. с Хасановым А. Ф. анализируют преимущества и недостатки различных методов забурирования боковых стволов. Авторами установлено, что наиболее эффективным является метод с вырезанием щелевид-

ного «окна» в стенке обсадной колонны с помощью клина-отклонителя и дальнейшим забуриванием бокового ствола через «окно».

Ломов А. П. в своём докладе представил принцип снижения риска аварий при фрезеровании обсадной колонны с использованием раздвижных колонных фрезеров с системой аварийного возврата. Установлено, что применение этой системы предотвращает аварии и сокращает время, необходимое для устранения проблем, возникающих во время процесса фрезерования [28].

Гасанов А. П. в статье [29] описаны пути повышения эффективности работы фрезера-райбера для восстановления аварийных нефтяных и газовых скважин и приведены расчеты для различных материалов обсадных колонн с последующими рекомендациями по процессу фрезерования.

В статье Абдуллина Н. М. [25] предложены практические рекомендации по безопасному фрезерованию участка обсадной колонны в наклонно-направленных скважинах с большими зенитными углами и в горизонтальных скважинах во время строительства или капитального ремонта.

В статье Шешуковой К. В. и Хайруллина А. А. рассматривается эффективность резки бокового ствола на примере бездействующей скважины Ямбургского месторождения. В ней авторы приходят к выводу, что эта технология позволяет вернуть в разработку скважины, которые

не могли быть задействованы при обычных операциях из-за геолого-технических условий [30].

В статье [31] описывается процесс реконструкции скважины путём фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне и последующего бурения бокового ствола на полупогружной плавающей буровой установке. Установлено, что проведённые работы позволили сохранить пробуренную часть ствола скважины и продлить срок эксплуатации месторождения.

В статье [32] сравниваются методы и технологии вырезания «окон» в обсадных колоннах и зарезки боковых стволов из существующих скважин российских и зарубежных сервисных компаний. Авторы отмечают, что для повышения режущей способности и наилучшего разрушения горных пород необходимо улучшать конструкции фрезерного инструмента.

В статье [33] Хасанова А. Ф. и Гаттаровой М. Р. рассмотрена система «Over Head» компании ООО НПП «Буринтех», предназначенная для фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне. Установлено, что преимуществом данной системы является фрезерование «окна» за один рейс за счет спуска, последующего ориентирования и посадки клина-отклонителя.

В статье [34] описываются преимущества от использования старой скважины с помощью фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне и

последующей зарезки горизонтального ствола. Так на газовом месторождении Сулиге, северо-западе Китая этот способ значительно снизил затраты на разработку скважины, повысил продуктивность и увеличил добычу в 3-5 раз.

В статье [35] описана обобщённая классификация осложнений и наиболее частые причины их возникновения на примере Восточно-Сургутского месторождения. Установлено, что основные проблемы связаны со следующими причинами:

- с прихватом инструмента и обсадных труб;
- с нестабильной работой фрезерного инструмента;
- с износом оборудования технической системы.

Исходя из анализа научно-технической информации определена классификация инструментов для забурирования бокового ствола скважины. Установлено, что наибольшее количество патентной информации приходится на изменение способов и поиск новых методов фрезерования, а также на совершенствование конструкций фрез-долот и фрезер-райберов (рис. 3), составляя более половины от всех проанализированных документов.

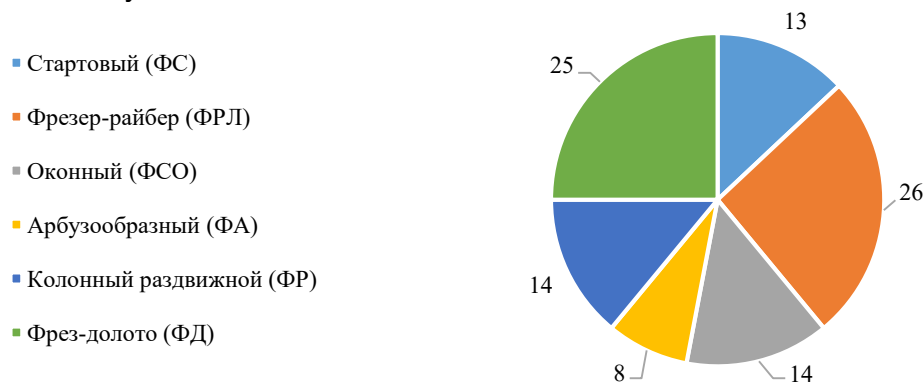


Рис. 3. Распределение патентов по типам фрезерующего инструмента за период 2011–2023 гг., %

Установлено, что количество зарегистрированных патентов и научных трудов увеличивается с каждым годом, а старые конструкции и методы постоянно совершенствуются и перерабатываются. Исходя из этого, можно сделать вывод, что разработка инновационных и усовершенствование существующих технологий и инструментов для создания «окна» в эксплуатационной колонне и последующее бурение боковых стволов, является динамично развивающимся и приоритетным направлением для восстановления заброшенных нефтедобывающих скважин, и увеличения добычи нефти на старых нефтеносных участках.

Разработками новых конструкций инструментов для фрезерования занимаются такие компании как: ООО НПП «Буринтех», ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент», ЗАО «Измерон», ООО «Фирма «Радиус-Сервис», ООО НПП «Бурсервис», ООО «Биттехника» ООО НПФ «Технология», ООО «Marlin Oil Tools», а также Halliburton Inc., Varel International Ind.

В статье [36] подробно рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются при использовании современных методик бурения боковых стволов и технологий для вторичного вскрытия продуктивных пластов. Исследование показало, что процессы бурения боковых стволов и гидравлического разрыва пласта осложняются из-за

тесного расположения газовой шапки и подстилающей воды, что обусловлено геологическими и технологическими особенностями. Кроме того, применение существующих методов вторичного вскрытия не приносит желаемых результатов из-за обширной зоны проникновения фильтрата бурового раствора или возникающей заколонной циркуляции [4, 35].

Установлено, что эффективное фрезерование эксплуатационных колонн и бурение сети разветвленных каналов сверхмалого диаметра и радиуса кривизны стало возможно благодаря технической системе (ТС) «Перфобур». В состав системы входит универсальный малогабаритный секционный ВЗД [2, 12, 22, 37, 38]. Первые поколения ТС «Перфобур» проходили испытания на стенде, где проводилось фрезерование образцов эксплуатационной колонны, и дальнейшее бурение песчано-цементного блока. В результате испытаний установлена надежность и работоспособность основных компонентов ТС, а также протестированы различные типы породоразрушающих и фрезерных инструментов [39, 40].

В компании ООО «Перфобур» работают с разными конструкциями фрез, сотрудничество ведется с различными фирмами по проектированию и изготовлению фрез: ООО «Petro Tool», ООО «Цитрин-Сервис», ООО «Marlin Oil Tools», ООО НПФ «Технология» и др. Стоит отметить, что серийно-выпускаемые фрезы для традиционных технологий «большого бурения» при зарезке боковых стволов не подходят для условий работы специальными малогабаритными двигателями [41, 42]. На практике, компания применяет конусные и торцевые фрезы, а также фрез-долота для малогабаритных ВЗД (до 55 мм) [41].

Отмечено, что впервые в мировой практике, в 2018 году, основателем и главным конструктором компании ООО «Перфобур» Ляговым И. А., с использованием разработанной компоновки для фрезерования, удалось вырезать фрезой диаметром 68 мм два «окна» длиной 70 мм каждое, в эксплуатационной колонне группы прочности К, с одной отметки, специальным малогабаритным ВЗД на скважине ООО «Башнефть-Добыча» [2, 43]. К моменту написания статьи уже было профрезеровано более 200 «окон», с дальнейшим бурением разветвленных каналов на скважинах ведущих нефтегазовых компаний Российской Федерации и стран ближнего и дальнего зарубежья [44, 45].

В ходе работы установлено, что работоспособность ВЗД наряду с безотказностью породоразрушающего или фрезерного инструмента определяют эффективность ведения работ [10, 46]. В статье [47] отмечено, что дифференциаль-

ные прихваты и прихваты вследствие заклинивания в местах деформирования поперечного сечения перфорационного канала являются потенциальными осложнениями при эксплуатации технической системы «Перфобур». Компания ООО «Перфобур» применяет комплекс мер для предотвращения риска дифференциального прихвата [48]:

- 1) обеспечение необходимой реологии бурового раствора;
- 2) использование специальных осцилляторов в тех зонах, где возможны осложнения;
- 3) применение специальных компоновок нижней части бурильной колонны с трубами различной частотной характеристики и забойным автоматом подачи долота;
- 4) контроль процесса бурения при вскрытии продуктивных пластов.

В настоящий момент времени компания работает над тем, чтобы кроме фрезерования «окна», технологически можно было продолжать непосредственное бурение за одну спуско-подъемную операцию, и для этого совершенствуют не только сами фрезерные инструменты, но и узлы технической системы. В процессе эксплуатации возникает необходимость своевременного мониторинга и оценки технического состояния компоновки, в том числе возможность прогнозирования подклинивания и заклинивания специального малогабаритного ВЗД.

Последние исследования показывают, что работу глубинного бурового оборудования в процессе эксплуатации можно контролировать, используя математическую обработку длительных временных рядов случайных колебаний технических параметров процесса бурения, представленных как стационарный случайный процесс с применением различных методов анализа [45]. Для анализа данные временных рядов замеров технологических параметров в процессе бурения удобнее представить, как последовательность случайных величин, что позволит использовать вероятностные и спектральные методы анализа [49].

Установлено, что во время работы ВЗД возникают колебания давления технологической жидкости и осевой нагрузки, при этом анализ протекающих при бурении скважин физических процессов, специфика и условия работы глубинного оборудования показывают, что эти явления часто носят непредсказуемый, случайный характер [42, 45]. Колебаниям, возникающим при бурении скважин, определяют особую роль при оценке технического состояния глубинного оборудования в процессе его эксплуатации. Поэтому, с каждым годом возрастает интерес к данной теме и ведутся дальнейшие исследования

[42, 50]. Разрабатываются различные способы и подходы к расшифровке получаемой информации. При этом интерес представляет исследование контроля забойных параметров по колебаниям, измеренных на устье скважины [51]. В этом случае, долото или фрез является естественным источником колебаний, а бурильная колонна представляет канал связи между забоем и устьем скважины [52, 53]. Колебания технологических параметров, сопровождающих процесс бурения, могут быть выражены в изменениях их спектральной характеристики и учтены в алгоритмах косвенной обработки измеряемых сигналов [54].

Исследование, проведенное с помощью визуализации колебаний, вызванных изменением осевой нагрузки на породоразрушающий или фрезерный инструмент, а также давления промышленной жидкости, выявило, что данные колебания не ограничиваются только гармоническими и непериодическими формами, но также проявляют себя в виде случайных событий. Эти наблюдения являются статистически значимыми [47, 55]. Возможность многократного измерения случайных колебаний технологических параметров процесса, при этом одновременно оценивая техническое состояние глубинного бурового оборудования, позволяет использовать методы теории вероятностей и математической статистики [56, 57]. Использование случайных процессов, при правильной расшифровке, позволяет оценивать техническое состояние глубинного оборудования [56, 58].

Вопросами изучения использования вероятностно-статистической оценки состояния оборудования в бурении и добыче как случайного процесса занимались: Ганджумян Р. А., Галеев А. С., Григулецкий В. Г., Гуреев И. Л., Ишемгузин Е. И., Ишемгузин И. Е., Керимов З. Г., Лягов А. В., Мирзаджанзаде А. Х., Науменко А. П., Симонов В. В., Симонянц С. Л., Санников Р. Х., Хасанов М. М., Шайдаков В. В., Юнин Е. К., Ямалиев В. У. и многие другие.

Различные критерии оценки технического состояния глубинного бурового оборудования, предложенные многими отечественными и зарубежными исследователями, в связи с постоянными изменениями условий бурения до сих пор не дали ответа на вопрос о наиболее рациональном времени работы [59, 60]. Определено несколько подходов при обработке забойной информации для контроля состояния оборудования в процессе бурения скважин, с помощью которых можно получить данные о нормальной эксплуатации без необходимости проведения активных экспериментов [55, 56].

Существует множество различных диагностических критериев для оценки технического состояния глубинного бурового оборудования в процессе эксплуатации, предложенных разными авторами, но не каждый из них, является основным и при их использовании должно выполняться условие независимости друг от друга [47]. Для косвенной оценки технического состояния породоразрушающего инструмента в процессе бурения скважин использованы следующие критерии, которые дополняют другие методы косвенной оценки:

1 Коэффициент Джини – это инструмент, который помогает выявить связь между изменениями случайных колебаний измеряемых технологических параметров и состоянием инструмента. Это позволяет быстро принимать решения по управлению процессом бурения [35, 61].

Недостатками коэффициента является то, что с помощью него сложно идентифицировать, в какой именно момент времени происходит максимальный износ оборудования [62].

2 Энтропийный анализ – это методика оценки уровня неопределенности, которая применяется к случайным процессам [63]. С учетом того, что в производственных условиях зачастую трудно точно определить момент, когда объект переходит из одного технического состояния в другое, предлагается сравнивать текущие значения энтропии с энтропией, зафиксированной в начальный момент бурения, например, при использовании нового инструмента, что позволяет выявить изменения и дать своевременные рекомендации по эксплуатации [49, 64].

Установленный недостаток данного анализа заключается в предположении, что переход из одного состояния в другое всегда связан с изменением технического состояния инструмента. Из-за этого точность вычислений может быть недостаточной для определения текущего состояния объекта.

3 Коэффициент вариации случайного процесса – это «критерий случайности» в теории вероятности. Коэффициент вариации используется для более полной характеристики динамичности процесса [59]. Интенсивность воздействия случайных факторов тоже может быть различной, в отдельных случаях рекомендуют использовать коэффициент вариации в качестве условной границы для разделения процессов на детерминированные и случайные [65].

Недостатками этого критерия оценки технического состояния являются низкая помехоустойчивость к внешним факторам и недостаточная точность оценки состояния породоразрушающего инструмента в процессе эксплуатации. Это приводит к низкой отработке инструмента и

возможности аварийных ситуаций в технической системе.

4 Показатель Херста является количественным показателем, который отражает степень упорядоченности амплитуд изучаемого параметра во времени и определяется как функция временного интервала в рамках масштабированного диапазона во временном ряде [66, 67]. Многие исследования указывают на то, что изменение режима работы является признаком наличия дефекта в оборудовании, так как в этот момент времени происходит переход сложной технической системы к хаотическому виду.

Недостатками метода определения технического состояния системы с помощью показателя Херста являются сложность определения критерия работоспособности, поскольку переход системы в хаотический режим не всегда указывает на наличие дефектов оборудования, также на результаты сильно влияют случайные факторы [49].

5 Выбросы случайных колебаний за некоторый уровень. Процесс бурения скважин может сопровождаться колебаниями технологических показателей, которые иногда превышают определенный порог. Это явление, называемое выбросами случайных колебаний, имеет существенное значение в рамках изучения теории случайных процессов [61]. Количество таких выбросов может использоваться в качестве индикатора для диагностики процесса бурения [68]. Для эффективного применения этого критерия важно понимать вопросы аппроксимации статистических характеристик случайных процессов [61].

Выявленные недостатки данного способа: непредсказуемость значений самого высокого уровня, за который имеет место хотя бы один выброс, отличие значений параметров для корреляционной функции и спектральной плотности, невозможность поправок в расчете на сложные условия эксплуатации оборудования.

6 Корреляционная размерность – это мера упорядоченности процессов, который может выступать в роли диагностического показателя для оценки состояния изучаемых систем [69]. Износ механизмов может сказаться на корреляционной размерности, то есть появление детерминированного хаоса может быть связано с нелинейными колебаниями в системе. Своевременный контроль значений корреляционной размерности может помочь предотвратить аварии с использованием глубинного бурового оборудования [70].

Основные недостатки этого способа включают теоретическое обоснование только для бесконечных и не зашумленных хаотических процессов, а также высокая трудоёмкость обработки большого объёма экспериментальных данных,

что снижает точность оценки технического состояния оборудования во время его эксплуатации.

7 Спектральный анализ для определения работоспособного состояния оборудования включает в себя периодическое определение энергетического спектра в области сверхнизких частот вращающего момента на бурильном инструменте [64, 67]. При этом за критерий работоспособности инструмента принимают отношение площадей энергетических спектров [71]. Также можно применять анализ спектра частот колебаний для оценки состояния оборудования. Для этого требуется измерить колебания промывочной жидкости и преобразовать их в их спектр. В данном случае, показателем износа инструмента является диапазон частот нормализованной плотности, а предельный уровень износа определяется отсутствием доминирующей частоты [64, 72].

Установлены следующие недостатки: трудности с выделением определённого сигнала из общего спектра, а также зашумление или затухание результирующего сигнала.

8 Фрактальный анализ используют для определения работоспособности породоразрушающего инструмента, он включает в себя измерение колебаний системы и определение эталонных значений, где, вычисляются фрактальные размерности по построенным фазовым кривым [73].

Недостатки этого анализа заключаются в сложности описания дефектов, требующей введения упрощённых моделей и допущений, а также в трудностях определения значений фрактальной размерности.

9 Фазовый анализ. Знание о том, что развитие динамической системы отображается в виде фазового портрета – пространства, где в качестве координат выступают элементы состояния [69], является ключевым для проведения анализа. При этом необходимо проводить аналитическую работу, сравнивая рекуррентные диаграммы и получая диаграммы различий на основе временных рядов. Этот анализ дает возможность определить несоответствия в функционировании системы и провести дальнейшую обработку выявленных данных с использованием математических методов [69].

Выявленные недостатки применяемого анализа: систематические погрешности из-за неточности учёта наложения дифракционных линий разных фаз и сложная процедура определения критерия работоспособности.

10 Вейвлет-анализ – это метод позволяющий обобщить данные спектрального анализа и являющийся интегральной функцией, однако он не сводим к какой-то одной формуле, потому что

существует множество конкретных функций, которые укладываются в рамки такого анализа. По аналогии с преобразованием Фурье вейвлет-преобразование сигнала состоит в его разложении по некоторому базису [74]. Вейвлет-преобразование одномерных сигналов, измеренных в начале и в процессе бурения, производят с определением их масштабно-временной развертки и значений полной энергии [50, 65]. В качестве базисной выбирается хорошо локализованная и по времени, и по частоте функция, обладающая рядом характерных признаков [64, 75]. В процессе бурения полученные значения необходимо сравнивать с эталонными, чтобы своевременно давать рекомендации по повышению точности оценки технического состояния породоразрушающего инструмента [76].

Этот тип анализа имеет такие недостатки: возможные амплитудные искажения и высокие погрешности из-за различий в масштабах и частотах, что приводит к неточной обработке результатов.

11 Методы статистического анализа включают в себя такой простой и эффективный инструмент, как метод Байеса, который особенно ценен при соблюдении определенных условий его применимости [61, 77]. Матрица Байеса применяется для анализа статистических данных, полученных при определенных условиях бурения и характеристиках технических устройств. Матрица Байеса помогает выявить признаки с наибольшей диагностической значимостью [77]. Существует несколько способов оценки диагностической важности признаков, где используется понятие диагностического веса реализации признака, чтобы не применять большую математическую обработку.

Метод Байеса имеет свои недостатки, главный из которых: большой объем предварительной информации и «угнетение» редко встречающихся диагнозов. Однако, если имеется достаточное количество статистических данных, метод Байеса можно применять как надёжный и эффективный инструмент для принятия решений [77].

Выводы.

1. Выявлено, что для восстановления заброшенных скважин и увеличения нефтеотдачи месторождений наиболее эффективным методом является фрезерование «окна» в эксплуатационной колонне с последующим бурением наклонно-направленных каналов с использованием специальных малогабаритных ВЗД. На основе анализа научно-технической информации об использовании фрезерных инструментов установлено, что существует необходимость в разра-

ботке новых и усовершенствовании существующих конструкций и методов эксплуатации, а также в своевременной оценке технического состояния для предотвращения аварийных ситуаций.

2. Определено, что в процессе эксплуатации существует необходимость своевременного мониторинга и оценки технического состояния компоновки, в том числе возможность прогнозирования подклинивания и заклинивания специального малогабаритного ВЗД.

3. Рассмотрены известные критерии косвенной оценки технического состояния глубинного оборудования, определено, что их применение не дает универсальных рекомендаций о рациональном времени работы глубинного оборудования. Установлено, что актуальным направлением будет являться разработка нового критерия диагностирования работоспособного состояния для последующего создания автоматизированной системы оценки технического состояния оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов С. ТРИЗ и налоги. Стимулы и препятствия для разработки трудноизвлекаемых запасов // Нефтегазовая вертикаль. Национальный отраслевой журнал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngv.ru/maga-zines/article/triz-i-nalogi/> (дата обращения: 12.04.2022).
2. Лягов И.А., Лягов А.В., Сулейманов И.Н., Качемаева М.А. Создание Технической системы «Перфобур» и исследование её работы в сильно искривленном канале при вынужденных продольных колебаниях // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2015. № 5. С. 45–105.
3. Лягов И.А., Лягов А.В., Исангулов Д.Р., Лягова А.А. Выбор необходимого количества промывочных переводников в специальной компоновке и исследование их работы при бурении радиально-разветвленных каналов секционными винтовыми двигателями // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 78–86.
4. Рязанов А.А., Ермаков А.С., Папиз В.А., Лягов И.А., Лягов А.В., Баширов А.И., Макаренко В.А., Султанов Э.Р. Технология повторного вскрытия пласта методом радиального бурения каналов с использованием технической системы «Перфобур» // Бурение и нефть. 2023. № 5. С. 12–17.
5. Bashirov A.I., Lyagov I.A., Galas I.R. Combination of radial drilling technology with acid jetting: New approach in carbonate reservoir stimulation // Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2020. UAE, 2022. Pp. 1–11. DOI: 10.2118/202661-MS.

6. Акимов О.В., Кемпф К.В., Шкарин Д.В., Донской А.В., Баширов А.И., Макаренко В.А., Касимов Д.Л., Лягов А.В., Лягов И.А. Применение технологии радиального вскрытия пласта на Северо-Хоседаюском месторождении // Нефтяное хозяйство. 2024. № 4. С. 28–31. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-4-28-31.
7. Двойников М. В., Леушева Е. Л. Современные тенденции освоения углеводородных ресурсов // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 879–880.
8. Galas I.R., Bashirov A.I., Makarenko V.A., Miftakhov S.A., Lyagov I.A., Dolman L.F., Gulyaev D.N., Nikonorova A.N. The Method of Directional Radial Drilling of Channels for Stimulation of Oil Rim // Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2022. UAE. 2022. Pp. 1–15. DOI: 10.2118/211482-MS.
9. Кагарманов Н.Ф., Давлетбаев М.Р., Самигуллин В.Х., Шайнуров Р.С., Юмашев Р.Х., Гилязов Р.М. Вскрытие продуктивных пластов горизонтальными скважинами. Межвузовский тематический сб. науч. тр. Уфа: УГНТУ. 1996. С. 159–174.
10. Шайдаков В.В., Шулепов В.А., Шестакова Е.В. Безотказность винтовых забойных двигателей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 9 (333). С. 21–24. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-9(333)-21-24.
11. Балденко Д.Ф., Балденко Ф.Д. Российские винтовые забойные двигатели: вчера, сегодня, завтра // Бурение и нефть. 2024. № 1. С. 46–53.
12. Гуринович А.В., Симонянц С.Л. Выбор винтового забойного двигателя на этапе проектирования строительства скважины // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2024. № 4. С. 6–9.
13. Системы телеметрии в горизонтальном бурении: опыт российских компаний // Нефтегазовая промышленность. 2022. С. 44–50. [Электронный ресурс]. URL: https://dprom.online/wpcontent/uploads/2022/09/2_2022_NP.pdf (дата обращения: 26.10.2024).
14. Симонянц С.Л. Совершенствование вращательных способов бурения нефтегазовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2024. № 11(383). С. 5–8.
15. Двойников М.В. Проектирование траектории скважин для эффективного бурения роторными управляемыми системами // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 254–262. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.254.
16. Двойников М.В., Сидоркин Д.И., Юртаев С.Л., Грохотов Е.И., Ульянов Д.С. Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с целью поиска и разведки новых месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 945–955. DOI: 10.31897/PMI.2022.55.
17. Кузнецов А.Б., Стефанов Р.Е., Рязанов М.В., Григулецкий В.Г. Новая методика оценки эффективности технологических решений вскрытия и освоения скважин в процессе бурения // Нефтепромышленное дело. 2022. № 5(641). С. 5–15. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-5-15.
18. Дерендяев В.В., Мелехин А.А., Чернышов С.Е. Разработка высокоскоростной системы передачи данных при управлении траекторией ствола скважины в процессе бурения // Бурение и нефть. 2023. № 1. С. 41–43.
19. Заболотный А.С., Муксинов Р.Р., Хасанов Р.А. Организация работ с целью снижения отклонений от плановой траектории при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин с винтовыми забойными двигателями // Бурение и нефть. 2023. № 10. С. 20–24.
20. Двойников М.В., Сидоров Д.А., Камбулов Е.Ю., Лаврик А.Ю. Солеотложение и рапопроявление: анализ проблем возникающих при строительстве скважин // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2022. № 10(130). С. 20–25.
21. Lyagov I.A., Liagov A.V., Liagova A.A. Optimization of the configuration of the power sections of special small-sized positive displacement motors for deep-penetrating perforation using the technical system «Perfobore» // Applied Sciences. Switzerland, 2021. 11(11). Pp. 49–77. DOI: 10.3390/app11114977.
22. Бореико Д.А., Сериков Д.Ю., Быков И.Ю. Анализ методов диагностики технического состояния шарошечных буровых долот корпусного типа // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. № 2 (122). С. 11–14. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-2(122)-11-14.
23. Лягов А.В., Лягов И.А., Сулейманов И.Н. Антивибрационные-стабилизирующие компоненты бурильной колонны для технической системы «Перфобур» // SOCAR Proceedings. Баку. 2020. № 4. С. 24–32. DOI: 10.5510/OGP20200400462.
24. Меджитов А.С. Перспективы развития технологии фрезерования «окна» в эксплуатационной колонне // Современные проблемы нефтегазового оборудования-2021. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2021. С. 65–69.
25. Абдуллин Н.М. Технологические особенности методов фрезерования обсадной ко-

лонны в вертикальных и наклонно-направленных скважинах // Бурение и нефть. 2024. № 1. С. 24–27.

26. Воевидко И.В., Чудык И.И. Особенности резки дополнительного ствола в эксплуатационной колонне скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2014. № 3. С. 15–18.

27. Хасанов А.Ф., Левинсон Л.М. Анализ преимуществ и недостатков методов забуривания боковых стволов // Инновационные научные исследования в современном мире. 2019. С. 111–116.

28. Ломов А.П. Снижение аварийности при фрезеровании обсадной колонны. Снижение затрат времени при освоении скважины // Бурение и нефть. 2011. № 7-8. С. 12–13.

29. Гасанов А.П. Повышение эффективности работы фрезера-райбера при прорезании «окна» второго ствола в обсадной колонне высокопрочных труб // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2010. № 4. С. 31–33.

30. Шешукова К.В., Хайруллин А.А. Зарезка боковых стволов как метод увеличения нефтеотдачи // Научный форум. Сибирь. 2016. Т. 2. № 4. С. 73–74.

31. Нуриев М.Ф., Уваров О.В., Максимов М.В., Решитняк Р.В., Илюшников А.В., Шакирова А.С., Карелина Р.А. Формирование окна в обсадной колонне и дальнейшее бурение бокового ствола скважины на Киринском ГКМ // Газовая промышленность. 2018. № 10(775). С. 26–32.

32. Насыров А.Л., Мухаметшин А.А., Саитбатаров Р.Р., Гараева А.Ф. Анализ промыслового опыта по зарезке боковых стволов с применением оборудования различных сервисных компаний на объектах ПАО «Татнефть» // Нефтяная провинция. 2023. № 2(34). С. 150–164. DOI: 10.25689/NP.2023.2.150-164.

33. Хасанов А.Ф., Гаттарова М.Р. Анализ эффективности резки боковых стволов системой «Over Head» // Интеграция науки, общества, производства и промышленности. 2019. С. 144–147.

34. Zhang J., Wang G., He K., Ye C. Practice and understanding of sidetracking horizontal drilling in old wells in Sulige Gas Field, NW China // Petroleum Exploration and Development. 2019. Vol. 149. No.2. Pp. 384–392. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60018-2.

35. Шлеин Г.А., Егоров В.Ю., Корунов И.Д. Анализ причин осложнений при резке и креплении боковых стволов скважин // Молодой ученый. 2019. № 46 (284). С. 72–76.

36. Lyagov I.A., Baldenko F.D., Lyagov A.V., Yamaliev V.U., Lyagova A.A. Methodology for calculating technical efficiency of power sections in

small-sized screw downhole motors for the «Perforbur» system // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. Pp. 694–700. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.694.

37. Рязанов А.А., Ермаков А.С., Папиж В.А., Султанов Э.Р., Лягов А.В., Лягов И.А., Макаренко В.А., Баширов А.И. Технология повторного вскрытия пласта методом радиального бурения каналов с использованием технической системы «Перфобур» // Нефтепромысловое дело. 2023. № 5(653). С. 5–12. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-5(653)-5-12.

38. Пат. 195139, Российская Федерация, МПК E21B 4/02, E21B 21/00, E21B 7/04. Бурильная компоновка с малогабаритным гидравлическим забойным двигателем / А.В. Лягов, И.А. Лягов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Перфобур». № 2019120556; заявл. 25.12.2017; опубл. 15.01.2020. Бюл. № 2. 17 с.

39. Лягов И.А., Соболев Д.Г., Лягов А.В., Балденко Ф.Д. Специальный винтовой забойный двигатель для технической системы «Перфобур» // Бурение и нефть. 2022. № 7-8. С. 22–27.

40. Рязанов А.А., Ермаков А.С., Лягов И.А., Баширов А.И., Лягов А.В., Макаренко В.А., Шубенок Р.Н. Технология радиального бурения каналов как метод восстановления аварийного фонда скважин // Инженер-нефтяник. 2024. № S5. С. 166–171.

41. Liagova A.A., Liagov I.A. The technology of completion reservoir by drilling a network of branched channels under controlled trajectory // Youth Technical Sessions Proceedings. Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council- Future Leaders Forum. 2019. Pp. 345–351. DOI: 10.1201/9780429327070-47.

42. Шестакова Е.В., Лягов И.А., Ямалиев В.У., Лягов А.В. О работоспособном состоянии инструмента в процессе фрезерования обсадной колонны забойными двигателями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 526–532. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-526-527.

43. Лягов И.А., Лягов А.В., Исангулов Д.Р., Лягова А.А. Выбор необходимого количества промывочных переводников в специальной компоновке и исследование их работы при бурении радиально-разветвленных каналов секционными винтовыми двигателями // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 78–86.

44. Лягов И.А., Лягов А.В., Шайдаков В.В., Грогуленко В.В., Зинатуллина Э.Я. Техническая система «Перфобур» для вторичного вскрытия продуктивного пласта // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2022. № 2(350). С. 47–52. DOI: 10.33285/0130-3872-2022-2(350)-47-52.

45. Шестакова Е.В., Лягов И.А., Ямалиев В.У., Лягов А.В. Использование критерия диагностирования для определения работоспособности фрезерного инструмента // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2024. № 10(382). С. 29–37.
46. Шайдаков В.В., Забиров Ф.Ш., Смольников Е.С. Безотказность нового и отремонтированного нефтяного оборудования, сооружений // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2024. № 8(380). С. 43–47.
47. Лягов И.А., Губайдуллин А.Г., Лягов А.В., Могучев А.И., Попов А.Н. Прогнозирование рисков заклинивания для исключения возможности прихватав технической системы «Перфобур» при бурении разветвленных каналов в терригенных коллекторах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 126–136. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2304.
48. Lyagov I.A., Vasilev N.I., Reich M., Mezzetti M. Analytical research and experimental tests on the technology for drilling small diameter channels with small radius of curvature // Oil Gas European Magazine. 2014. Vol. 40. No. 3. Pp. 124–129.
49. Пат. 2183266, Российская Федерация, МПК E21B 44/06, E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / В.У. Ямалиев, А.Х. Мирзаджанзаде, М.М. Хасанов, Е.И. Ишемгузин, И.Е. Ишемгузин; заявитель и патентообладатель «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2000124651/03; заявл. 27.09.2000; опубл. 10.06.2002. 5 с.
50. Михайлов А.Г., Шубин С.С., Алферов А.В., Имашев Р.Н., Ямалиев В.У. Повышение эффективности диагностирования эксплуатации скважинных штанговых насосов с помощью сверточных нейронных сетей // Нефтяное хозяйство. 2018. № 9. С. 122–126. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-9-122-126.
51. Кутузов П.А., Двойников М.В., Мелехин А.А., Юртаев С.Л., Кузнецова Н.Ю., Ярмолинский Л.М. Оперативный контроль технологии бурения. Оптическое волокно как новый инструмент измерений и связи для условий бурения наклонно-направленных скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2023. № 5(365). С. 11–19. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-5(365)-11-19.
52. Ганджумян Р.А., Симонянц С.Л. К вопросу об изучении вибрации бурильной колонны как случайного процесса // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 3. С. 5–8. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-3-5-8.
53. Ганджумян Р.А., Бронников И.Д., Тунгузов А.А., Нахангов Х.Н. Амплитуда продольных колебаний долота и нижнего торца бурильной амортизированной системы // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2020. № 2. С. 32–33.
54. Ганджумян Р.А., Сырчина А.С., Попов В.О. Изучение вибраций долот с твердосплавным вооружением при бурении с очисткой забоя воздухом // Инженер-нефтяник. 2021. № 1. С. 60–63.
55. Ленков С.Н., Ямалиев В.У., Зубаиров С.Г. Вибродиагностические исследования на стенде цепного привода штангового скважинного насоса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 5. С. 76–82.
56. Mingazov R.R., Yamaliev V.Y. Development of vibration resistant PDC bit during drilling hard rock formation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd. 2022. 032055. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032055.
57. Бронников, И.Д., Тошов Ж.Б., Нахангов Х.Н. Аналитическая модель взаимодействия зубков шарошечного долота с забоем скважины // Инженер-нефтяник. 2017. № 2. С. 16–19.
58. Yamaliev V., Imaeva E., Salakhov T. About the deep drilling equipment technical condition recognition method // Oil and Gas Business 2009. No 1. Pp. 1–27.
59. А. с. 1629455, Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения степени износа опор турбобура / Е.И. Ишемгузин, Б.З. Султанов, В.У. Ямалиев, О.А. Заикина; заявитель Уфимский нефтяной институт. № 4391324; заявл. 10.03.1988; опубл. 23.02.1991. 3 с.
60. Burda E.A., Zusman G.V., Kudryavtseva I.S., Naumenko A.P. An Overview of Vibration Analysis Techniques for the Fault Diagnostics of Rolling Bearings in Machinery // Shock and Vibration. 2022. Vol. 2022. 6136231. DOI: 10.1155/2022/6136231.
61. Ишемгузин И.Е., Имаева Э.Ш. Оценка технического состояния глубинного бурового оборудования с использованием выбросов случайных колебаний осевой нагрузки // Электронный научный журнал. Нефтегазовое дело. 2003. № 1. С. 1–8.
62. Пат. 2819317, Российская Федерация, МПК E21B 47/007, E21B 45/00. Способ определения работоспособности фрезерного инструмента / Е.В. Шестакова, И.А. Лягов, В.У. Ямалиев, А.В. Лягов, И.Н. Сулейманов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2023133380; заявл. 12.12.2023; опубл. 17.05.2024. Бюл. № 14. 14 с.

63. Бурда Е.А., Богомолов Д.Е., Наumenко А.П. Энтропийный подход при фильтрации сигналов акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 1(295). С. 34–44. DOI: 10.14489/td.2023.01.pp.034-044.

64. Пат. 2335629, Российская Федерация, МПК E21B 44/00. Устройство для оценки состояния породоразрушающего инструмента / В.У. Ямалиев, Т.Р. Салахов, Э.Ш. Имаева; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2006145009/03; заявл. 18.12.2006; опубл. 10.10.2008. 10 с.

65. Yamyalyiev V., Imaeva E., Salakhov T. Evaluation Procedure of technical condition of deep drilling equipment with use of neural networks // Oil and Gas Business. 2007. No. 2. Pp. 42–49.

66. Ленков С.Н., Ямалиев В.У. Диагностирование состояния цепного привода на основе статистического анализа вибросигналов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 251–255.

67. Пат. 2739875, Российская Федерация, МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / В.У. Ямалиев, И.Р. Мамалимова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2020116660; заявл. 12.05.2020; опубл. 29.12.2020. 11 с.

68. Пат. 2124125, Российская Федерация, МПК E21B 44/00, E21B 45/00. Способ регулирования оптимальной осевой нагрузки на долото при бурении скважин / И.Е. Ишемгузин, В.У. Ямалиев, В.В. Пашинский, Е.И. Ишемгузин, М.Н. Козлов, С.В. Назаров, Э.М. Галеев; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный нефтяной технический университет. № 97103910/03; заявл. 12.03.1997; опубл. 27.12.1998. 5 с.

69. Ямалиев В.У., Салахов Т.Р., Шубин С.С. Применение элементов теории детерминированного хаоса к решению задач технического диагностирования УЭЦН // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2014. № 4. С. 174–191.

70. А. с. 1800011, Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ

определения работоспособности породоразрушающего инструмента / А.Х. Мирзаджанзаде, Е.И. Ишемгузин, М.М. Хасанов, В.У. Ямалиев, Б.В. Гейер, О.А. Заикина; заявитель Уфимский нефтяной институт. № 4910926; заявл. 12.02.1991; опубл. 07.03.1993. 3 с.

71. А. с. 1506094, Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Е.И. Ишемгузин, Б.З. Султанов, В.У. Ямалиев, В.П. Жулаев, А.В. Лягов, В.В. Шайдаков, А.С. Муртазин, А.Н. Зотов; заявитель Уфимский нефтяной институт. № 4301919; заявл. 03.09.1987; опубл. 07.09.1989. 2 с.

72. А. с. 1427059, Союз Советских Социалистических Республик, МПК E21B 45/00. Способ определения степени износа породоразрушающего инструмента / Е.И. Ишемгузин, В.У. Ямалиев, Б.З. Султанов, В.В. Шайдаков, А.В. Лягов, В.П. Жулаев, И.Е. Ишемгузин; заявитель Уфимский нефтяной институт. № 4142241; заявл. 08.09.1986; опубл. 30.09.1988. 3 с.

73. Пат. 2321737, Российская Федерация, МПК E21B 44/06. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / Е.И. Ишемгузин, Р.Ф. Надыршин, Э.Я. Зинатуллина, Э.Ш. Имаева, А.Н. Зотов, И.Е. Ишемгузин, А.Р. Атнагулов; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». № 2006124726/03; заявл. 10.07.2006; опубл. 10.04.2008. 5 с.

74. Пат. 2188939, Российская Федерация, МПК E21B 45/00. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / В.У. Ямалиев, М.М. Хасанов, Р.Н. Якупов, Е.И. Ишемгузин, И.Р. Кузеев, Д.С. Солодовников; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЮганскНИПИнефть». № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002. 11 с.

75. Хасанов М.М., Якупов Р.Н., Ямалиев В.У. Вейвлет-анализ в задаче диагностирования нефтепромыслового оборудования // Вестник Инжинирингового центра ЮКОС. 2001. № 2. С. 22–25.

76. Валиахметов Р.И., Ямалиев В.У., Шубин С.С., Алферов А.В. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 2. С. 159–167.

77. Ямалиев В.У., Гареев Р.Р. Определение технического состояния динамического оборудо-

ования по результатам диагностических измерений // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. № 3. С. 78–82.

Информация об авторах

Шестакова Евгения Владимировна, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», старший преподаватель кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов». E-mail: shestakova2525@yandex.ru. Уфимский государственный нефтяной технический университет. Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

Поступила 01.11.2024 г.

© Шестакова Е.В., 2025

Shestakova E.V.

Ufa State Petroleum Technological University

E-mail: shestakova2525@yandex.ru

ABOUT DIFFERENT APPROACHES TO USING MILLING TOOLS

Abstract. *The article establishes that the creation of small channels from a cased well with a given radius of curvature along a pre-planned trajectory remains an urgent direction for restoring abandoned wells and increasing oil recovery from old fields. Information about a downhole milling tool for milling a "window" in an operational column and subsequent drilling of channels using special small-sized screw downhole motors is reviewed. The scientific and technical information has been analyzed and it has been established that the relevant directions are the development of new and improvement of well-known tool structures for milling "windows" in casing columns of various strength groups. The prospect of monitoring the parameters of deep-sea equipment throughout its use through statistical analysis of time series, including changes in the technological parameters of milling, is investigated. The general information on the use of fluctuations in the technological parameters of the axial load on the milling tool and the pressure of the flushing liquid during the milling process, presented as a random process, is considered. The well-known criteria for indirect assessment of the technical condition of deep-sea equipment are analyzed, and it is determined that the condition of independence must be fulfilled when using them. It has been established that an important direction is the development of a new criterion for diagnosing a working condition for the subsequent creation of an automated system for monitoring and evaluating the technical condition of equipment, including the possibility of predicting wedging and jamming of a special small-sized screw downhole engine.*

Keywords: *secondary opening of the reservoir, milling of the production column, screw downhole motor, milling tool, diagnostic criteria, technical diagnostics.*

REFERENCES

1. Tihonov S. TRIZ and taxes. Incentives and obstacles for the development of hard-to-recover reserves [TRIZ i nalogi. Stimuly i prepyatstviya dlya razrabotki trudnoizvlekaemykh zapasov]. Oil and gas vertical. National Industry Magazine. URL: <http://www.ngv.ru/maga-zines/article/triz-i-nalogi/> (date of application: 12.04.2022). (rus)

2. Lyagov I.A., Lyagov A.V., Suleymanov I.N., Kachemaeva M.A. Creation of the Perfobur Technical system and study of its operation in a strongly curved channel with forced longitudinal vibrations [Sozdanie Tekhnicheskoy sistemy «Perfobur» i issledovanie eyo raboty v sil'no iskrivlennom kanale pri vyzhdenykh prodol'nykh kolebaniyah]. Network journal «Oil and Gas Business». 2015. No 5. Pp. 45–105. (rus)

3. Lyagov I.A., Lyagov A.V., Isangulov D.R., Lyagova A.A. Selection of the required number of flushing adapters in a special arrangement and investigation of their operation when drilling radially

branched channels with sectional screw motors [Vybor neobhodimogo kolichestva promyvochnykh perevodnikov v special'noj komponente i issledovanie ih raboty pri burenii radial'no-razvetvlyennykh kanalov sekcionnymi vintovymi dvigatelyami]. Journal of Mining Institute. 2024. Vol. 265. Pp. 78–86. (rus)

4. Ryazanov A.A., Yermakov A.S., Papizh V.A., Lyagov I.A., Lyagov A.V., Bashirov A.And., Makarenko V.A., Sultanov. E.R. The technology of re-opening the reservoir by radial channel drilling using the Perfobur technical system [The technology of re-opening the reservoir by radial channel drilling using the Perfobur technical system]. Drilling and Oil [Burenie i nef't']. 2023. No 5. Pp. 12–17. (rus)

5. Bashirov A.I., Lyagov I.A., Galas I.R. Combination of radial drilling technology with acid jetting: New approach in carbonate reservoir stimulation. Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2020. UAE, 2022. Pp. 1–11. DOI: 10.2118/202661-MS.

6. Akimov O.V., Kempf K.V., SHkarin D.V., Donskoj A.V., Bashirov A.I., Makarenko V.A., Kasimov D.L., Lyagov A.V., Lyagov I.A. Application of radial seam opening technology at the Severo-Khosedayskoye field [Primenenie tekhnologii radial'nogo vskrytiya plasta na Severo-Hosedayuskom mestorozhdenii]. Oil Industry. 2024. No 4. Pp. 28-31. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-4-28-31. (rus)
7. Dvoynikov M.V., Leusheva E.L. Modern trends in hydrocarbon resources development [Sovremennye tendencii osvoeniya uglevodorodnykh resursov]. Journal of Mining Institute. 2022. No. 258. Pp. 879–880. (rus)
8. Galas I.R., Bashirov A.I., Makarenko V.A., Miftakhov S.A., Lyagov I.A., Dolman L.F., Gulyaev D.N., Nikonorova A.N. The Method of Directional Radial Drilling of Channels for Stimulation of Oil Rim // Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2022. UAE. 2022. Pp. 1–15. DOI: 10.2118/211482-MS.
9. Kagarmanov N.F., Davletbaev M.R., Samigullin V.H., SHajnurov R.S., YUmashev R.H., Gilyazov R.M. Opening of productive formations with horizontal wells [Vskrytie produktivnykh plastov gorizontallynymi skvazhinami]. ezhvuzovskij tematicheskij sb. nauch. tr. Ufa: UGNTU. 1996. Pp. 159–174. (rus)
10. Shaidakov V.V., Shulepov V.A., Shestakova E.V. Reliability of screw downhole motors [Bezotkaznost' vintovykh zabojnykh dvigatelej]. Construction of oil and gas wells on land and sea. 2020. No 9 (333). Pp. 21–24. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-9(333)-21-24. (rus)
11. Baldenko D.F., Baldenko F.D. Russian positive displacement motors: yesterday, today, tomorrow [Rossijskie vintovye zabojnye dvigateli: vchera, segodnya, zavtra]. Drilling and Oil [Burenie i neft']. 2024. No 1. Pp. 46-53. (rus)
12. Gurinovich A.V., Simonyants S.L. Selecting a screw downhole motor at the design stage of well drilling [Vybor vintovogo zabojnogo dvigatelya na etape proektirovaniya stroitel'stva skvazhiny]. Bulletin of the Association of Drilling Contractors. 2024. No 4. Pp. 6–9. (rus)
13. Telemetry systems in horizontal drilling: the experience of Russian companies [Sistemy telemekhaniki v gorizontallynnoy burenii: opyt rossijskikh kompanij]. Oil and gas industry. 2022. Pp. 44–50. URL: https://dprom.online/wp-content/uploads/2022-09/2_2022_NP.pdf (date of application: 26.10.2024). (rus)
14. Simonyants S.L. Improvement of rotational drilling methods for oil and gas wells [Sovershenstvovanie vrashchatel'nykh sposobov burenii neftegazovykh skvazhin]. Construction of oil and gas wells on land and sea. 2024. No 11(383). Pp. 5-8. (rus)
15. Dvoynikov M.V. Well trajectory design for efficient drilling by rotary controlled systems [Proektirovanie traektorii skvazhin dlya effektivnogo burenii rotornymi upravlyaemyimi sistemami]. Journal of Mining Institute. 2018. Vol. 231. Pp. 254–262. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.254. (rus)
16. Dvoynikov M.V., Sidorkin D.I., Yurtaev S.L., Grokhotov E.I., Ulyanov D.S. Drilling of deep and ultra-deep wells in order to search and explore new mineral deposits [Burenie glubokikh i sverhglubokikh skvazhin s cel'yu poiska i razvedki novykh mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh]. Journal of Mining Institute. 2022. No. 258. Pp. 945–955. DOI:10.31897/PMI.2022.55. (rus)
17. Kuznetsov A.B., Stefanov R.E., Ryazapov M.V., Griguletsky V.G. A new methodology for evaluating the effectiveness of technological solutions for opening and developing wells in the drilling process [Novaya metodika ocenki effektivnosti tekhnologicheskikh reshenij vskrytiya i osvoeniya skvazhin v processe burenii]. Oilfield engineering. 2022. No. 5(641). Pp. 5–15. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-5(641)-5-15. (rus)
18. Derendyaev V.V., Melekhin A.A., Chernyshov S.E. Development of a high-speed data transmission system for controlling the trajectory of the borehole during drilling [Razrabotka vysokoskorostnoj sistemy peredachi dannykh pri upravlenii traektoriej stvola skvazhiny v processe burenii]. Drilling and Oil [Burenie i neft']. 2023. No. 1. Pp. 41-43. (rus)
19. Zabolotnyj A.S., Muksinov R.R., Hasanov R.A. Organization of work in order to reduce deviations from the planned trajectory when drilling directional and horizontal wells with screw downhole motors [Organizatsiya rabot s cel'yu snizheniya otklonenij ot planovoj traektorii pri burenii naklonno-napravlennykh i gorizontallynykh skvazhin s vintovymi zabojnymi dvigatelyami]. Drilling and Oil [Burenie i neft']. 2023. No 10. Pp. 20–24. (rus)
20. Dvoynikov M.V., Sidorov D.A., Kambulov E.Yu., Lavrik A.Yu. Salt deposition and rapid occurrence: analysis of problems arising during the construction of wells [Soleotlozhenie i rapoproyavlenie: analiz problem voznikayushchih pri stroitel'stve skvazhin]. Business Magazine Neftegaz.RU. 2022. No. 10(130). Pp. 20–25. (rus)
21. Lyagov I.A., Liagov A.V., Liagova A.A. Optimization of the configuration of the power sections of special small-sized positive displacement motors for deep-penetrating perforation using the technical system «Perfobore». Applied Sciences. Switzerland, 2021. 11(11). Pp. 49–77. DOI: 10.3390/app11114977.

22. Borejko D.A., Serikov D.YU., Bykov I.YU. Analysis of diagnostic methods for the technical condition of shell-type roller drill bits [Analiz metodov diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya sharoshechnykh burovnykh dolot korpusnogo tipa]. Equipment and technologies for oil and gas complex. 2021. No 2 (122). Pp. 11–14. DOI:10.33285/1999-6934-2021-2(122)-11-14. (rus)
23. Lyagov A.V., Lyagov I.A., Sulejmanov I.N. Anti-vibration-stabilizing drill string arrangements for the Perfobur technical system [Antivibratsionnye-stabiliziruyushchie komponenty buril'noy kolonny dlya tekhnicheskoy sistemy «Perfobur»]. SOCAR Proceedings. Baku. 2020. No 4. Pp. 24–32. DOI: 10.5510/OGP20200400462. (rus)
24. Medzhitov A.S. Prospects for the development of "window" milling technology in an operational column [Perspektivy razvitiya tekhnologii frezerovaniya «okna» v ekspluatatsionnoy kolonne]. Modern problems of oil and gas equipment-2021 [Sovremennyye problemy neftegazovogo oborudovaniya-2021]. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University. 2021. Pp. 65–69. (rus)
25. Abdullin N.M. Technological features of casing milling methods in vertical and directional wells [Tekhnologicheskie osobennosti metodov frezerovaniya obsadnoy kolonny v vertikal'nykh i naklonno-napravlennykh skvazhinah]. Drilling and Oil [Burenie i nef't']. 2024. No 1. Pp. 24–27. (rus)
26. Voevidko I.V., Chudyk I.I. Features of cutting an additional trunk in the production well column [Osobennosti zarezki dopolnitel'nogo stvola v ekspluatatsionnoy kolonne skvazhiny]. Construction of oil and gas wells on land and sea. 2014. No 3. Pp. 15–18. (rus)
27. Hasanov A.F., Levinson L.M. Analysis of the advantages and disadvantages of side barrel drilling methods [Analiz preimushchestv i nedostatkov metodov zaburivaniya bokovykh stvolov]. Innovatsionnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire. 2019. Pp. 111–116. (rus)
28. Lomov A.P. Reduction of accidents during casing milling. Reducing the time spent on well development [Snizhenie avarijnosti pri frezerovanii obsadnoy kolonny. Snizhenie zatrat vremeni pri osvoenii skvazhiny]. Drilling and Oil [Burenie i nef't']. 2011. No 7-8. Pp. 12–13. (rus)
29. Hasanov A.P. Improving the efficiency of the reiber milling cutter when cutting through the "window" of the second barrel in the casing of high-strength pipes [Povyshenie effektivnosti raboty frezera-rajbera pri prorezanii «okna» vtorogo stvola v obsadnoy kolonne vysokoprochnykh trub]. Equipment and technologies for the oil and gas complex. 2010. No. 4. Pp. 31–33. (rus)
30. Sheshukova K.V., Hajrullin A.A. Side barrel cutting as a method of increasing oil recovery [Zarezka bokovykh stvolov kak metod uvelicheniya nefteotdachi]. Scientific Forum. Siberia [Nauchnyy forum. Sibir']. 2016. Vol. 2. No 4. Pp. 73–74. (rus)
31. Nuriev M.F., Uvarov O.V., Maksimov M.V., Reshitnyak R.V., Ilyushnikov A.V., Shakirova A.S., Karelina R.A. Formation of a window in the casing and further drilling of the lateral borehole at the Kirinsky Gas field [Formirovanie okna v obsadnoy kolonne i dal'neyshee burenie bokovogo stvola skvazhiny na Kirinskom gKm]. GAS Industry of Russia. 2018. No 10(775). Pp. 26–32. (rus)
32. Nasyrov A.L., Muhametshin A.A., Saitbatalov R.R., Garaeva A.F. Analysis of the field experience in cutting side barrels using equipment from various service companies at the facilities of PJSC Tatneft [Analiz promyslovogo opyta po zarezke bokovykh stvolov s primeneniem oborudovaniya razlichnykh servisnykh kompaniy na ob'ektakh PAO «Tatneft»]. Neftyanaya Provintsiya. 2023. No 2(34). Pp. 150–164. DOI: 10.25689/NP.2023.2.150-164. (rus)
33. Khasanov A.F., Gattarova M.R. Analysis of the effectiveness of cutting side barrels with the «Over Head» system [Analiz effektivnosti zarezki bokovykh stvolov sistemoy «Over Head»]. Integratsiya nauki, obshchestva, proizvodstva i promyshlennosti. 2019. Pp. 144–147. (rus)
34. Zhang J., Wang G., He K., Ye C. Practice and understanding of sidetracking horizontal drilling in old wells in Sulige Gas Field, NW China. Petroleum Exploration and Development. 2019. Vol. 149. No.2. Pp. 384–392. DOI: 10.1016/S1876-3804(19)60018-2.
35. Shlein G.A., Egorov V.YU., Korunov I.D. Analysis of the causes of complications during cutting and fastening of lateral boreholes [Analiz prichin oslozhnenij pri zarezke i krepnenii bokovykh stvolov skvazhin]. Young scientist. 2019. No 46 (284). Pp. 72–76. (rus)
36. Lyagov I.A., Baldenko F.D., Lyagov A.V., Yamaliev V.U., Lyagova A.A. Methodology for calculating technical efficiency of power sections in small-sized screw downhole motors for the «Perfobur» system. Journal of Mining Institute. 2019. No. 240. Pp. 694–700. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.694.
37. Ryazanov A.A., Ermakov A.S., Papizh V.A., Sultanov E.R., Lyagov A.V., Lyagov I.A., Makarenko V.A., Bashirov A.I. The technology of re-opening the reservoir by radial channel drilling using the Perfobur technical system [Tekhnologiya povtornogo vskrytiya plasta metodom radial'nogo burenija kanalov s ispol'zovaniem tekhnicheskoy sistemy «Perfobur»]. Oilfield engineering. 2023. No 5(653). Pp. 5–12. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-5(653)-5-12. (rus)
38. Lyagov A.V., Lyagov I.A. Drilling layout with a small-sized hydraulic downhole motor

[Buril'naya komponovka s malogabaritnym gidravlicheskim zabojnym dvigatelem] Patent RF, no. 2019120556, 2020.

39. Lyagov I.A., Sobolev D.G., Lyagov A.V., Baldenko F.D. Special screw downhole motor for the Perfobur technical system [Special'nyj vintovoj zabojnyj dvigatel' dlya tekhnicheskoy sistemy «Perfobur»]. Drilling and Oil [Burenie i nef't]. 2022. No 7-8. Pp. 22–27. (rus)

40. Ryazanov A.A., Ermakov A.S., Lyagov I.A., Bashirov A.I., Lyagov A.V., Makarenko V.A., SHubenok R.N. Radial channel drilling technology as a method of restoring the emergency fund of wells [Tekhnologiya radial'nogo bureniya kanalov kak metod vosstanovleniya avarijnogo fonda skvazhin]. Inzhener-neftyanik. 2024. No S5. Pp. 166–171. (rus)

41. Liagova A.A., Liagov I.A. The technology of completion reservoir by drilling a network of branched channels under controlled trajectory. Youth Technical Sessions Proceedings. Proceedings of the 6th Youth Forum of the World Petroleum Council- Future Leaders Forum. 2019. Pp. 345–351. DOI: 10.1201/9780429327070-47.

42. Shestakova E.V., Lyagov I.A., Yamaliev V.U., Lyagov A.V. About the working condition of the tool in the process of milling the casing with downhole motors [O rabotosposobnom sostoyanii instrumenta v processe frezerovaniya obsadnoj kolonny zabojnymi dvigatelyami]. News of the Tula state university. Technical sciences. 2024. No 5. Pp. 526–532. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-526-527. (rus)

43. Lyagov I.A., Lyagov A.V., Isangulov D.R., Lyagova A.A. Selection of the required number of flushing adapters in a special arrangement and investigation of their operation when drilling radially branched channels with sectional screw motors [Vyb- or neobhodimogo kolichestva promyvochnyh perevodnikov v special'noj komponovke i issledo- vanie ih raboty pri burenii radial'no-razvetvlen- nyh kanalov sekcionnymi vintovymi dvigatelyami]. Journal of Mining Institute. 2024. Vol. 265. Pp. 78–86. (rus)

44. Lyagov I.A., Lyagov A.V., Shaidakov V.V., Grogulenko V.V., Zinatullina E.Ya. Perfobur technical system for secondary opening of a productive reservoir [Tekhnicheskaya sistema «Perfobur» dlya vtorichnogo vskrytiya produktivnogo plasta]. Construction of oil and gas wells on land and sea. 2022. No 2(350). Pp. 47–52. DOI: 10.33285/0130-3872-2022-2(350)-47-52. (rus)

45. Shestakova E.V., Lyagov I.A., Yamaliev V.U., Lyagov A.V. Using a diagnostic criterion to determine the operability of a milling tool [Ispol'zovanie kriteriya diagnostirovaniya dlya opre- deleniya rabotosposobnosti frezernogo instrumenta].

Construction of oil and gas wells on land and sea. 2024. No 10(382). Pp. 29–37. (rus)

46. Shaidakov V.V., Zabirov F.Sh., Smolnikov E.S. Reliability of new and repaired oil equipment, structures [Bezotkaznost' novogo i otremonirovan- nogo neftyanogo oborudovaniya, sooruzhenij]. Con- struction of oil and gas wells on land and sea. 2024. No. 8(380). Pp. 43–47. (rus)

47. Lyagov I.A., Gubaidullin A.G., Lyagov A.V., Moguchev A.I., Popov A.N. Forecasting the risks of jamming to eliminate the possibility of grab- bing the technical system "Perfobur" when drilling branched channels in terrigenous reservoirs [Prognozirovanie riskov zaklinivaniya dlya isklyucheniya vozmozhnosti prihvotov tekhnich- eskoy sistemy «Perfobur» pri burenii razvetvlen- nyh kanalov v terrigennyh kollektorah]. Bulletin of the tomsk polytechnic university. Geo assets engineer- ing. 2019. Vol. 330. No 10. Pp. 126–136. DOI: 10.18799/24131830/2019/10/2304. (rus)

48. Lyagov I.A., Vasilev N.I., Reich M., Mez- zetti M. Analytical research and experimental tests on the technology for drilling small diameter chan- nels with small radius of curvature. Oil Gas Euro- pean Magazine. 2014. No. 40(3). Pp. 124–129.

49. Yamaliev V.U., Mirzajanzade A.H., Khasanov M.M., Ishemguzhin E.I., Ishemguzhin I.E. A method for determining the operability of a rock- crushing tool. Patent RF, no 2000124651/03, 2002.

50. Mikhailov A.G., Shubin S.S., Alferov A.V., Imashev R.N., Yamaliev V.U. Improving the effi- ciency of diagnosing the operation of downhole rod pumps using convolutional neural networks [Pov- yshenie effektivnosti diagnostirovaniya ekspluata- cii skvazhinnyh shtangovyh nasosov s pomoshch'yu svertochnykh nejronnyh setej]. Oil industry. 2018. No 9. Pp. 122–126. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-9-122-126. (rus)

51. Kutuzov P.A., Dvoynikov M.V., Melekhin A.A., Yurtaev S.L., Kuznetsova N.Yu., Yarmolinsky L.M. Operational control of drilling technology. Op- tical fiber as a new measurement and communication tool for directional well drilling conditions [Opera- tivnyj kontrol' tekhnologii bureniya. Opticheskoe volokno kak novyj instrument izmerenij i svyazi dlya uslovij bureniya naklonno-napravlennyh skvazhin]. Construction of oil and gas wells on land and sea. 2023. No. 5(365). Pp. 11–19. DOI: 10.33285/0130-3872-2023-5(365)-11-19. (rus)

52. Ganjumyan R.A., Simonyants S.L. On the issue of studying the vibration of a drill string as a random process [K voprosu ob izuchenii vibracii buril'noj kolonny kak sluchajnogo processa]. Con- struction of oil and gas wells on land and sea. 2018. No 3. Pp. 5–8. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-3-5-8. (rus)

53. Ganjumyan R.A., Bronnikov I.D., Tungusov A.A., Nakhangov H.N. Amplitude of longitudinal vibrations of the bit and the lower end of the damped drilling system [Amplituda prodol'nyh kolebanij dolota i nizhnego torca buril'noj amortizirovannoj sistemy]. Association of Drilling Contractors. 2020. No. 2. Pp. 32–33. (rus)
54. Ganjumyan R.A., Syrchina A.S., Popov V.O. Study of vibrations of bits with carbide armament during drilling with air purification [Izuchenie vibracij dolot s tverdospлавnym vooruzheniem pri burenii s ochistkoj zaboya vozduhom]. Inzhener-neftyanik. 2021. No. 1. Pp. 60–63. (rus)
55. Lenkov S.N., Yamaliev V.U., Zubairov S.G. Vibrodiagnostic studies on the stand of a chain drive of a rod borehole pump [Vibrodiagnosticheskie issledovaniya na stende cepnogo privoda shtangovogo skvazhinного nasosa]. Bulletin of the tomsk polytechnic university. Geo assets engineering. 2018. Vol. 329. No 5. Pp. 76–82. (rus)
56. Mingazov R.R., Yamaliev V.Y. Development of vibration resistant PDC bit during drilling hard rock formation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd. 2022. Pp. 032055. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032055.
57. Bronnikov, I.D., Toshov Zh.B., Nakhangov H.N. Analytical model of interaction of teeth of a roller bit with the bottom of a well [Analiticheskaya model' vzaimodejstviya zubkov sharoshechnого dolota s zaboem skvazhiny]. Inzhener-neftyanik. 2017. No. 2. Pp. 16–19. (rus)
58. Yamaliev V., Imaeva E., Salakhov T. About the deep drilling equipment technical condition recognition method. Oil and Gas Business 2009. No 1. Pp. 1–27.
59. Ishemguzhin E.I., Sultanov B.Z., Yamaliev V.U., Zaikina O.A. Method for determining the degree of wear of turbobur supports. Patent USSR, no 4391324, 1991.
60. Burda E.A., Zusman G.V., Kudryavtseva I.S., Naumenko A.P. An Overview of Vibration Analysis Techniques for the Fault Diagnostics of Rolling Bearings in Machinery. Shock and Vibration. 2022. No. 2022. Pp. 6136231. DOI: 10.1155/2022/6136231.
61. Ishemguzhin I.E., Imaeva E.Sh. Assessment of the technical condition of deep drilling equipment using emissions of random axial load fluctuations [Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya glubinnого burovogo oborudovaniya s ispol'zovaniem vybrosov sluchajnyh kolebanij osevoj nagruzki]. Network journal «Oil and Gas Business». 2003. No 1. Pp. 1–8. (rus)
62. Shestakova E.V., Lyagov I.A., Yamaliev V.U., Lyagov A.V., Suleymanov I.N. Method for determining the operability of milling tools. Patent RF, no 2023133380, 2024.
63. Burda E.A., Bogomolov D.E., Naumenko A.P. Entropy approach to filtering acoustic emission signals [Entropijnyj podhod pri fil'tracii signalov akusticheskoy emissii]. Control. Diagnostics. 2023. No. 1(295). Pp. 34–44. DOI: 10.14489/td.2023.01. Pp. 034-044.
64. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Imaeva E.S. A device for assessing the condition of a rock-breaking tool. Patent RF, no 2006145009/03, 2008.
65. Yamaliev V.U., Imaeva E.Sh., Salakhov T.R. On the possibility of recognizing the technical conditions of deep drilling equipment [O vozmozhnosti raspoznavaniya tekhnicheskikh sostoyanij glubinnого burovogo oborudovaniya]. Petroleum engineering. 2005. No 3. Pp. 127–132. (rus)
66. Lenkov S.N., Yamaliev V.U. Diagnosing the condition of a chain drive based on statistical analysis of vibration signals [Diagnostirovanie sostoyaniya cepnogo privoda na osnove statisticheskogo analiza vibrosignalov]. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 19. No 1-2. Pp. 251–255. (rus)
67. Yamaliev V.U., Mamalimova I.R. Method for determining the operability of a rock-breaking tool. Patent RF, no 2020116660, 2020.
68. Ishemguzhin I.E., Yamaliev V.U., Pashinsky V.V., Ishemguzhin E.I., Kozlov M.N., Nazarov S.V., Galeev E.M., Lyagov A.V. A method for regulating the optimal axial load on a chisel when drilling wells. Patent RF, no 97103910/03, 1997.
69. Yamaliev V.U., Salakhov T.R., Shubin S.S. Application of elements of the theory of deterministic chaos to solving problems of technical diagnostics of ESP [Primenenie elementov teorii determinirovannого haosa k resheniyu zadach tekhnicheskого diagnostirovaniya UECN]. Network journal «Oil and Gas Business». 2014. No 4. Pp. 174–191. (rus)
70. Mirzajanzade A.H., Ishemguzhin E.I., Khasanov M.M., Yamaliev V.U., Geyer B.V., Zaikina O.A. Method for determining the operability of a rock-crushing tool. Patent USSR, no 4910926, 1993.
71. Ishemguzhin E.I., Sultanov B.Z., Yamaliev V.U., Zhulaev V.P., Lyagov A.V., Shaidakov V.V., Murtazin A.S., Zotov A.N. Method for determining the operability of a rock-crushing tool. Patent USSR, no 4301919, 1989.
72. Ishemguzhin E.I., Yamaliev V.U., Sultanov B.Z., Shaidakov V.V., Lyagov A.V., Zhulaev V.P., Ishemguzhin I.E. Method for determining the degree of wear of a rock-crushing tool. Patent USSR, no 4142241, 1988.

73. Ishemguzhin E.I., Nadyrshin R.F., Zinatulina E.Ya., Imaeva E.Sh., Zotov A.N., Ishemguzhin I.E., Atnagulov A.R. Method for determining the operability of a rock-crushing tool. Patent RF, no 2006124726/03, 2008.

74. Yamaliev V.U., Khasanov M.M., Yakupov R.N., Ishemguzhin E.I., Kuzeev I.R., Solodovnikov D.S. A method for determining the operability of a rock-crushing tool. Patent RF, no 2001113974/03, 2002.

75. Khasanov M.M., Yakupov R.N., Yamaliev V.U. Wavelet analysis in the task of diagnosing oil-field equipment [Vejvlet-analiz v zadache diagnostirovaniya neftepromyslovogo oborudovaniya]. Vestnik inzhiniringovogo centra YUKOS. 2001. No 2. Pp. 22–25. (rus)

76. Valiakhmetov R. I., Yamaliev V. U., Shubin S. S., Alferov A.V. The use of heuristic algorithms in data analysis to solve the problem of diagnosing electric centrifugal pumping units [Primenenie evristicheskikh algoritmov v analize dannykh dlya resheniya zadachi diagnostirovaniya elektrocen-trobezhnykh nasosnykh ustanovok]. Bulletin of the Tomsk polytechnic university. Geo assets engineering. 2018. Vol. 329. No 2. Pp. 159–167. (rus)

77. Yamaliev V.U., Gareev R.R. Determination of the technical condition of dynamic equipment based on the results of diagnostic measurements [Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya dinamicheskogo oborudovaniya po rezul'tatam diagnosticheskikh izmerenij]. Petroleum engineering. 2012. Vol. 10. No 3. Pp. 78–82. (rus)

Information about the author

Shestakova, Evgeniya V. Postgraduate student. E-mail: shestakova2525@yandex.ru. Ufa State Petroleum Technological University. Russia, 450064, Ufa, st. Kosmonavtov, 1.

Received 01.11.2024

Для цитирования:

Шестакова Е.В. О различных подходах использования фрезерного инструмента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 118–136. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-118-136

For citation:

Shestakova E.V. About different approaches to using milling tools. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 118–136. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-118-136

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148

*Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: duyun77@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ ДРОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОТКРЫТОЙ ПЛАТФОРМЫ GYM-PYBULLET-DRONES

Аннотация. В данной работе рассмотрена симуляционная среда *gym-pybullet-drones*, являющаяся открытой платформой, ориентированной на специалистов в области робототехники, как инструмент для моделирования динамики квадрокоптеров и разработки алгоритмов управления. Проведено моделирование динамики движения группы дронов с целью проверки работоспособности и устойчивости управления PID-контроллера. Моделирование выполнялось по двум сценариям: движение трех дронов по круговой траектории на разных высотах в одном направлении и движение двух дронов по синусоидальной траектории на разных высотах в противоположных направлениях. В обоих сценариях учитывалось влияние аэродинамических эффектов (*downwash effect*) на динамику исследуемых объектов. Проведенный анализ показал, что PID-контроллер обеспечивает стабильное удержание траектории, но с учетом внешних возмущений, таких как аэродинамические эффекты, наблюдаются корректирующие колебания параметров движения. Исследование влияния нисходящих воздушных потоков продемонстрировало значительное воздействие на нижний квадрокоптер, выраженное в скачках высоты, углов ориентации и изменении скоростей вращения двигателей. Результаты работы подтверждают возможность использования *gym-pybullet-drones* для оценки и оптимизации систем управления дронами, что особенно актуально при разработке многоагентных систем беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: квадрокоптеры, моделирование, PID-контроллер, симуляционная среда, *gym-pybullet-drones*, машинное обучение, управление дронами, *downwash effect*, аэродинамические эффекты, многоагентные системы.

Введение. В последнее время наблюдаются значительные достижения в области проектирования, разработки систем управления и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 2]. Современные БПЛА нашли широкое применение в различных сферах: решение задач логистики и мониторинга окружающей среды, спасательные и военные операции [3, 4]. Выполняемые БПЛА задачи становятся все сложнее, а к системе их управления предъявляют все более жесткие требования: адаптация к меняющимся условиям полета и нестабильности внешних факторов, обход динамических препятствий [5]. В связи с этим усилия исследователей направлены на решение ряда актуальных задач: расчет и управление траекторией движения [6, 7], моделирование движения, в том числе группы аппаратов [8, 9], совершенствование систем управления [10]. Для успешного развития этих направлений требуется создание и совершенствование инструментов, поддерживающих проектирование роботизированных систем, используемых в БПЛА [11, 12]. Симуляции являются важным этапом в разработке как робототехнических платформ, так и систем их управления, особенно в тех случаях, когда создание физических прототипов сопряжено с высокими затратами и рисками [13]. Современные симуляторы, такие как Gazebo и Webots, а также их интеграция с

ROS, широко используются в робототехнике, однако возможности их применения в ряде задач управления, особенно связанных с удаленным или параллельным выполнением, ограничены [14]. В ряде работ рассматриваются методы оптимизации управления роем дронов, включая использование матриц Адамара и алгоритмов самоорганизации, что позволяет повысить вычислительную эффективность и стабильность полета группы аппаратов [15]. Кроме того, в исследованиях уделяется внимание моделированию движения БПЛА с учетом внешних факторов, что позволяет повысить точность навигации и управления [16, 17]. В ряде работ рассматриваются методы адаптации параметров ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей, что позволяет повысить точность управления движением БПЛА. В частности, предлагаются алгоритмы оптимальной настройки коэффициентов регулятора на основе моделей прямого и обратного распространения, обеспечивающие снижение ошибок стабилизации по крену и тангажу, что имеет особое значение для работы в сложных условиях полета [18].

Инструментарий OpenAI Gym созданный в 2016 году, был направлен на решение проблемы отсутствия стандартизации среди эталонных задач, применяемых в робототехнических исследованиях, он предоставляет как набор эталонных

задач, так и набор способов и правил (Application Programming Interface, API) для создания новых сред. За пять лет он стал одним из наиболее упоминаемых инструментов в научных публикациях, получив более 2000 цитирований. Помимо стандартного API OpenAI Gym предлагает широкий спектр задач. Простейшие из них, такие как «Classical control» и «Box2D», представляют собой двумерные задачи с дискретными пространствами действий. Более сложные задачи, такие как «Robotics» и «MuJoCo», включают управление роботизированными манипуляторами и моделями движения роботов в трёхмерных пространствах (Swimmer, Hopper, HalfCheetah и другие). Для их реализации используется проприетарный физический движок MuJoCo.

Физический движок MuJoCo также лежит в основе набора задач DeepMind's dm control. Хотя среды dm control не поддерживают API Gym, их структура аналогична, и набор задач DeepMind охватывает управление локомоцией и манипуляцией с объектами. Однако упрощения, такие как сглаживание контактов, ограничивают реалистичность этих сред, что затрудняет перенос разработанных алгоритмов на физические роботы.

Необходимость лицензирования MuJoCo привела к разработке открытых альтернатив, таких как DART от Georgia Tech/CMU и Google's Bullet Physics с его Python-библиотекой PyBullet. На основе движка Bullet были созданы задачи управления и локомоции, которые доступны в pybullet-gym. Помимо этого, сообщества разработчиков создали среды Gym, например, gym-minigrid, представляющие собой двумерные задачи с сеточными пространствами. Эти среды широко использовались в научных исследованиях, получив более 30 упоминаний в публикациях с 2018 по 2021 год.

Среди Gym-сред для квадрокоптеров популярностью пользуется gymfc. Она ориентирована на переносимость алгоритмов управления на физическое оборудование, предлагая инструменты для обучения контроллеров ориентации квадрокоптеров, которые превосходят PID-контроллеры в симуляциях Gazebo. Схожий подход описан в [19], где рассматривается обучение нейронной сети для стабилизации квадрокоптера Crazyflie 2.x в реальных условиях. Однако, gym-pybullet-drones является первой универсальной средой Gym, предназначенной для задач многоагентного обучения с использованием квадрокоптеров.

Поскольку RL тесно связано с задачами управления, большинство симуляций фокусируются на типичных примерах, таких как балансировка маятника. Однако высокая вычислительная

трудоемкость алгоритмов RL требует использования упрощённых моделей, что снижает реализм симуляций. Это создает проблему, так как алгоритмы, обученные в подобных условиях, могут плохо коррелировать с реальными робототехническими задачами.

Рассмотрим подробнее известные симуляторы квадрокоптеров. RotorS является популярным симулятором для моделирования квадрокоптеров, построенным на базе ROS и Gazebo. Он поддерживает несколько моделей многороторных систем AscTec и симулирует работу датчиков, таких как IMU. Однако RotorS не предлагает встроенных интерфейсов для задач обучения с подкреплением, а его зависимость от Gazebo ограничивает возможности параллельного выполнения задач и использования в приложениях, основанных на визуальных данных. Расширением RotorS является CrazyS, разработанный специально для работы с нано-квадрокоптером Bitcraze Crazyflie 2.x. Благодаря доступности и популярности этой платформы в научных исследованиях, Crazyflie также был выбран в качестве основной модели квадрокоптера в gym-pybullet-drones. Однако CrazyS сталкивается с теми же ограничениями, что и RotorS, делая его менее удобным для задач обучения с подкреплением.

AirSim от Microsoft представляет собой один из наиболее известных симуляторов, поддерживающих различные типы транспортных средств, включая автомобили и квадрокоптеры. Он предоставляет фотореалистичную визуализацию благодаря использованию Unreal Engine 4, что делает его отличным инструментом для разработки приложений автономного управления. Однако высокие вычислительные требования и упрощенная физика столкновений (использующая FastPhysicsEngine в режиме многороторного управления) ограничивают его пригодность для задач обучения управления. Кроме того, AirSim не предлагает встроенного интерфейса Gym, хотя сообщество разработало инструменты, позволяющие управлять квадрокоптерами с помощью команд скорости.

Наиболее близким к gym-pybullet-drones является симулятор Flightmare, разработанный в ETH и основанный на Unity. Flightmare предоставляет как фотореалистичную визуализацию, так и высокоскоростную параллельную динамику. Он поддерживает API Gym и рабочий процесс для задач одноагентного RL. Однако в отличие от gym-pybullet-drones, Flightmare не включает среды Gym с наблюдениями на основе визуальных данных, совместимых с многоагентным RL, что ограничивает его возможности в области коллективного управления.

Методика. В данной работе рассматривается методика применения среды `gym-pybullet-drones`, разработанной как открытая платформа для определения задач управления одним или несколькими квадрокоптерами. Она ориентирована на специалистов в области робототехники и машинного обучения, предоставляя удобный инструмент для реализации RL-алгоритмов. Основные преимущества `gym-pybullet-drones` включают:

- реализм: учёт столкновений, аэродинамических эффектов и возможность расширения динамической модели;
- гибкость: поддержка многоагентных систем RL, задач визуального обучения и других сценариев;
- параллельность: одновременное выполнение нескольких симуляций;
- простота использования: наличие встроенных контроллеров PID и поддержка библиотек RL, таких как `Stable Baselines3`.

Рассмотрим подробнее возможности и особенности применения среды `gym-pybullet-drones`.

Инструментарий `OpenAI Gym` создан для стандартизации разработки задач и алгоритмов обучения с подкреплением (RL) на Python. В рамках стандартной модели Маркова (MDP) класс среды принимает действие, использует его для обновления своего внутреннего состояния (шага) и возвращает новое состояние (наблюдение), а также соответствующее вознаграждение. Этот процесс напоминает простой контур обратной связи, где контроллер подает управляющий сигнал объекту, чтобы получить (возможно, зашумленные) измерения на выходе.

Кроме того, `OpenAI Gym` предоставляет дополнительную информацию о терминальных состояниях (`done`) и стандартный API для сброса среды между эпизодами, а также для получения информации о пространстве действий и наблюдений. Эти возможности делают `Gym` универсальным инструментом для разработки и тестирования RL-алгоритмов.

Данная среда имеет физический движок, который является незаменимым инструментом для исследований в робототехнике и машинном обучении: ускоряет процесс разработки и тестирования новых приложений, обеспечивает генерацию больших наборов данных для обучения алгоритмов. В ней использован открытый физический движок `Bullet Physics`. Его выбор обусловлен следующими факторами: высокоэффективная система управления столкновениями, поддержка рендеринга как на CPU, так и на GPU, совместимость с унифицированным форматом описания

роботов (URDF). Возможность пошагового выполнения физики позволяет синхронизировать рендеринг и кинематику, а также управлять ими с произвольной частотой. Эти преимущества делают `Bullet Physics` отличным выбором для симуляции сложных сценариев.

Для моделирования сил и моментов, действующих на квадрокоптеры, в среде `gym-pybullet-drones` используется библиотека `PyBullet`. Этот инструмент позволяет рассчитывать и обновлять кинематические параметры всех транспортных средств на основе их взаимодействий с окружающей средой. Физический движок обеспечивает точное моделирование поведения квадрокоптеров, учитывая как их аэродинамические свойства, так и взаимодействия с поверхностями и препятствиями.

Стандартной моделью квадрокоптера, используемой в `gym-pybullet-drones`, является `Bitcraze Crazyflie 2.x`. Благодаря своей популярности и доступности эта платформа позволяет использовать данные идентификации системы и результаты реальных экспериментов для задания параметров. Основные характеристики квадрокоптера, такие как длина рычага L , масса m , инерционные свойства J , физические константы и форма модели для столкновений, задаются в файлах URDF. Эти параметры подготовлены как для конфигурации в виде креста, так и для конфигурации с прямыми лучами. Помимо этого, предоставлены URDF-файлы для более крупной модели квадрокоптера, основанной на конструкции `Hummingbird`.

`PyBullet` позволяет задавать ключевые параметры симуляции, включая ускорение свободного падения g и частоту шагов выполнения физики, которая может быть значительно выше частоты управления в `Gym`. В дополнение к физическим константам `PyBullet` использует данные из URDF-файлов для загрузки CAD-моделей квадрокоптера.

Силы, прикладываемые к каждому из четырёх моторов, а также момент, возникающий вокруг вертикальной оси квадрокоптера, зависят от квадратов скоростей моторов в оборотах в минуту (RPM). Эти параметры линейно связаны с сигналами широтно-импульсной модуляции (PWM), которые используются для управления моторами. Для упрощения считается, что управление моторами осуществляется практически мгновенно. В процессе полета могут возникать дополнительные аэродинамические эффекты, вызванные взаимодействием с окружающей средой. Это особенно заметно при полете вблизи земли или при взаимодействии с другими летательными аппаратами. `PyBullet` предоставляет

возможность моделировать такие эффекты отдельно и интегрировать их в общую физическую систему.

Каждый раз, когда *gym-pybullet-drones* выполняет шаг симуляции, включающий несколько шагов физического движения, система возвращает вектор наблюдений. В кодовой базе среды предусмотрено несколько вариантов представления наблюдений, однако все они включают основную кинематическую информацию. Эта информация представлена в виде словаря, где ключи соответствуют индексам дронов, а значения содержат: позиции x, y, z ; кватернионы q ; углы крена (*roll*), тангажа (*pitch*) и рыскания (*yaw*); линейные (v) и угловые (ω) скорости; скорости двигателей (*RPM*).

Используя интеграцию *PyBullet* с *TinyRenderer* и *OpenGL3*, *gym-pybullet-drones* поддерживает создание наблюдений в виде видеоизображений с перспективы каждого дрона. Эти наблюдения могут включать: RGB-видео, глубинные карты, сегментацию объектов. Эти данные формируются в направлении положительной локальной оси каждого аппарата и могут быть полезны для задач визуального обучения.

Для выполнения шага в *gym-pybullet-drones* необходимо передать действие, представляющее собой управляющий ввод. Поскольку различные робототехнические задачи требуют разных уровней абстракции (например, стабилизация или планирование траектории), в среде реализовано несколько вариантов пространств действий. Стандартное пространство действий *gym-pybullet-drones* представлено в виде словаря, где ключами выступают индексы дронов, а значениями — массивы скоростей четырех двигателей, выраженных в оборотах в минуту (*RPM*). Альтернативно, управление может осуществляться через словарь, содержащий векторы желаемой скорости. В этом случае PID-контроллер переводит входные скорости в сигналы ШИМ (широтно-импульсной модуляции) для управления моторами. Этот контроллер включает подпрограммы, реализующие позиционное и угловое управление, что позволяет учитывать особенности траектории движения и стабилизации квадрокоптера.

Основная часть. В данной работе были выполнены две сессии вычислительного эксперимента посредством симуляции динамики полета группы квадрокоптеров с использованием среды *gym-pybullet-drones* с целью проверки работоспособности PID-регулятора, который управляет квадрокоптерами, осуществляющими движение по круговой траектории в плоскости X-Y на разных высотах и учитывает возмущающие факторы в виде аэродинамических эффектов.

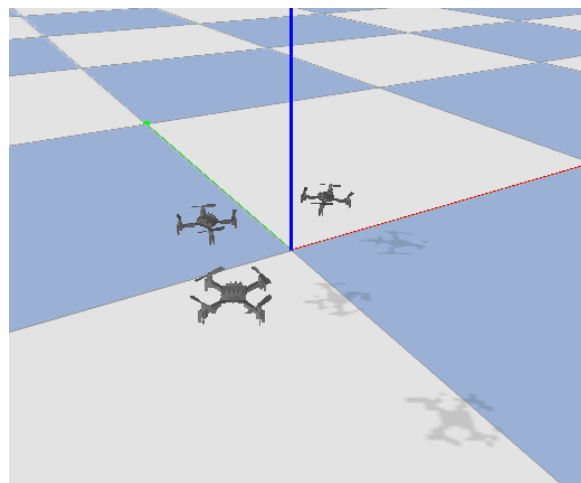


Рис. 1. Расчетная схема траекторий движения квадрокоптеров первой сессии

В качестве основных входных условий при проведении первой сессии вычислительного эксперимента (расчетная схема на рис. 1) приняты следующие характеристики:

- в симуляции участвуют три квадрокоптера, каждый из которых следует по круговой траектории вокруг заданной центральной точки;
- дроны двигаются на разных высотах, что позволяет оценить влияние вертикального расположения на точность траектории;
- управление осуществляется PID-контроллером (*DSLPIIDControl*), который корректирует углы наклона и скорость двигателей для точного следования траектории;
- контроллер использует кинетические данные (позиции, углы ориентации, скорости перемещения) и корректирует управление на каждом временном шаге.

Выходными параметрами первой сессии вычислительного эксперимента являются следующие данные:

- графики траекторий движения (позиция, скорость движения, углы ориентации);
- стабильность движения — анализируется, насколько точно дроны следуют заданной траектории.
- колебания и устойчивость PID-регулятора, отображенные в динамике управления.

На рис. 2 представлены графики координатного положения квадрокоптеров, которые отображают движение по заданной траектории и позволяют оценить насколько стабильно удерживается траектория. На графиках видно, что все три дрона движутся по круговой траектории в плоскости X-Y на разных высотах, движение выглядит плавным, но не является идеальным, присутствуют небольшие отклонения, что связано с

влиянием аэродинамических эффектов и коррекцией PID-контроллера, движение по вертикальной оси стабильное, каждый дрон сохраняет свой уровень высоты. На рис.3 представлены графики углов ориентации, которые описывают наклон и поворот дрона в воздухе: roll (r) и pitch (p) - колебания вокруг осей X и Z, yaw (y) - поворот вокруг вертикальной оси. Видно, что roll (r) и pitch (p) демонстрируют характерные колебания, что связано с реакцией на изменение траектории, они остаются в пределах небольшого диапазона, что подтверждает стабильность управления. Yaw (y) практически стабилен, что говорит о том, что дроны не вращаются вокруг своей оси.

На рис. 4 и рис. 5 изображены соответственно угловые и линейные скорости движения квадрокоптеров. Графики угловых скоростей имеют существенные колебания, это типично для систем, в которых контроллер активно компенсирует небольшие ошибки положения. Линейные скорости V_x и V_y изменяются плавно, что соответствует движению дронов по круговой траектории, скорость V_z (по оси z) остается практически нулевой после начального этапа полета, что указывает на стабильное удержание высоты, небольшие изменения V_z можно заметить в начале полета, что связано с выходом дронов на заданные высоты.

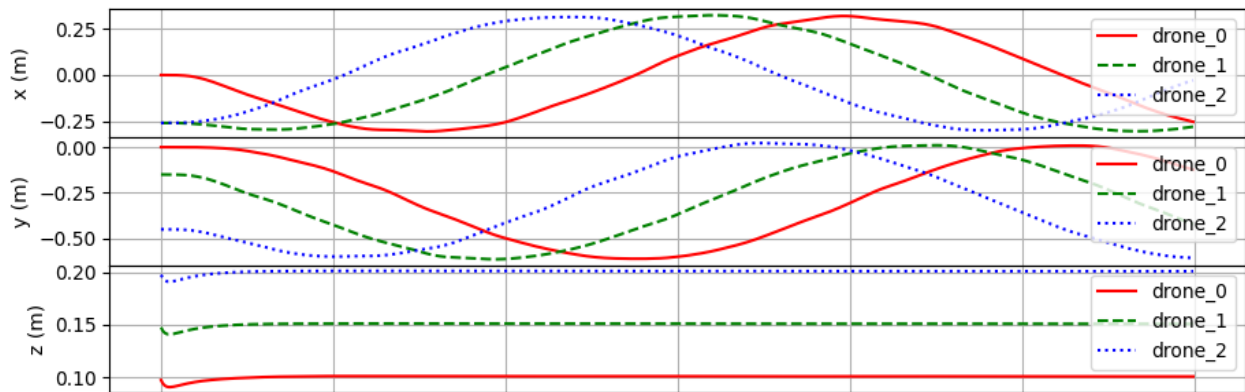


Рис. 2. Траектории движения дронов трех в пространстве

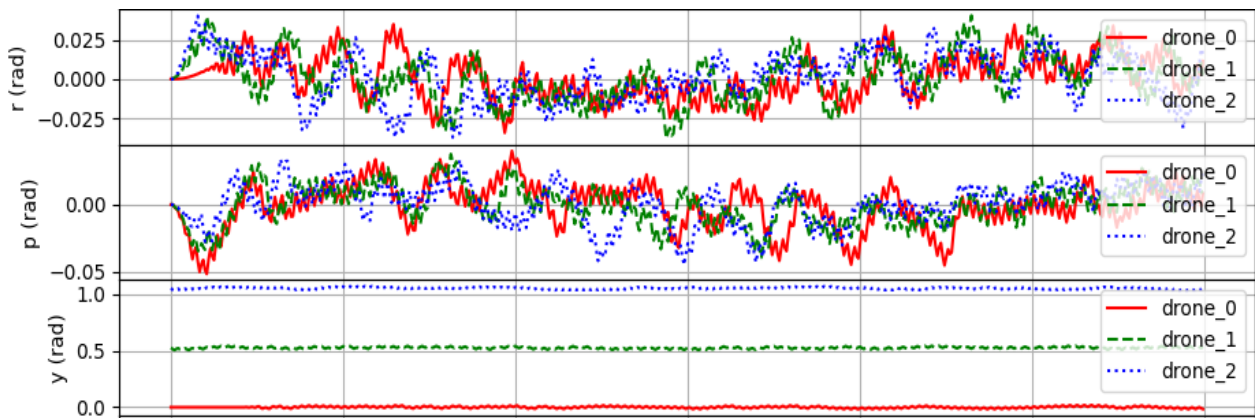


Рис. 3. Углы ориентации трех дронов в пространстве

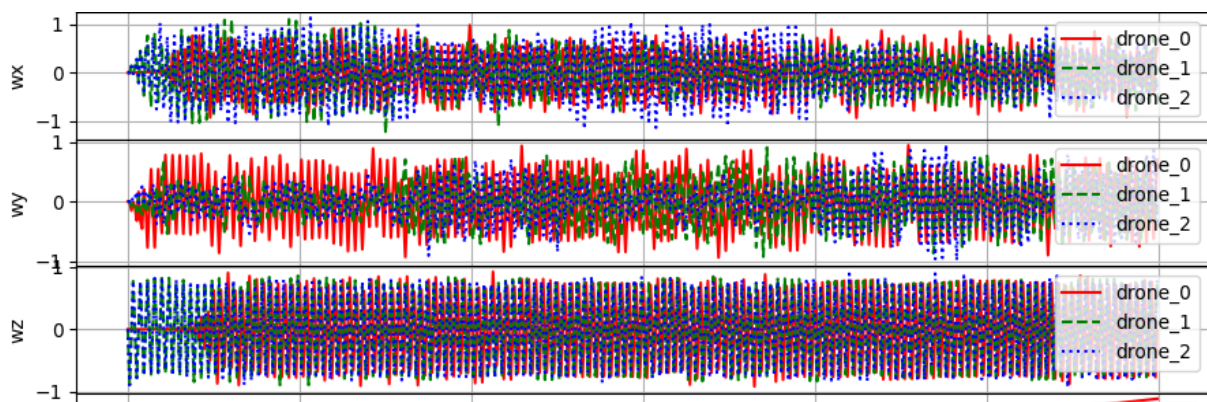


Рис. 4. Угловые скорости движения трех квадрокоптеров

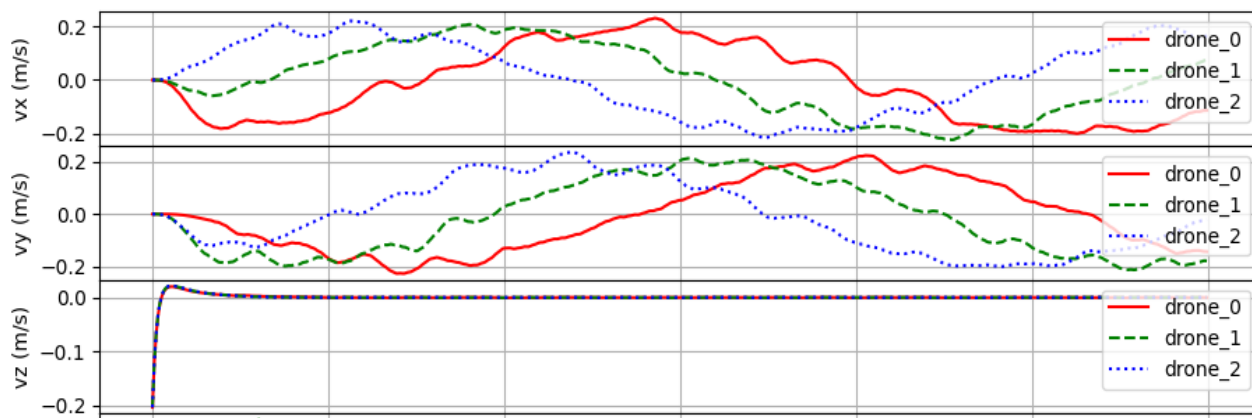


Рис. 5. Линейные скорости движения трех квадрокоптеров

На рис. 6 и рис. 7 соответственно изображены графики крутящего момента, прикладываемые к дрону для его ориентации, и скорости вращения четырех двигателей для каждого дрона.

Можно заметить, что двигатели работают в разном режиме, компенсируя аэродинамические эффекты. Это означает, что контроллер адаптирует работу моторов в ответ на возникающие возмущения.

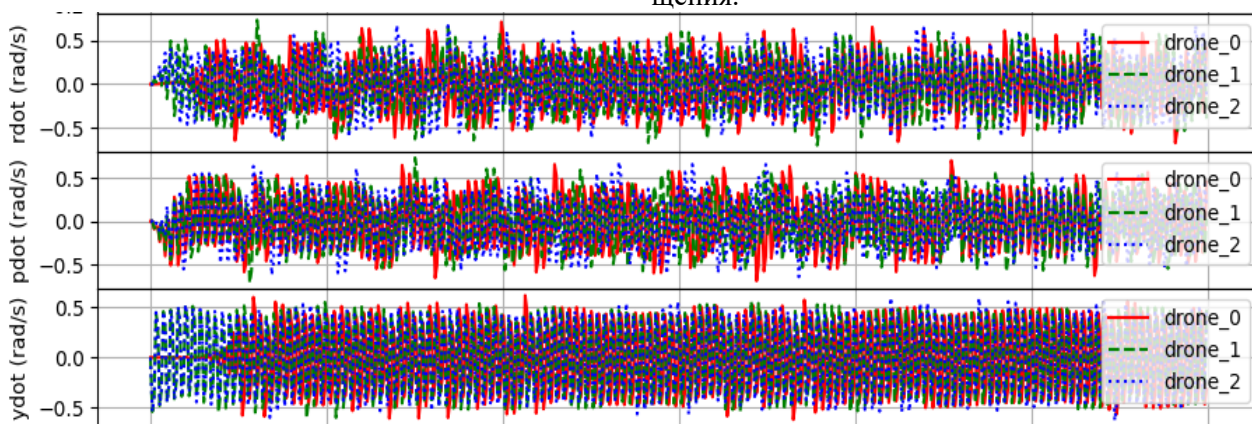


Рис. 6. Крутящие моменты, прикладываемые для ориентации трех квадрокоптеров

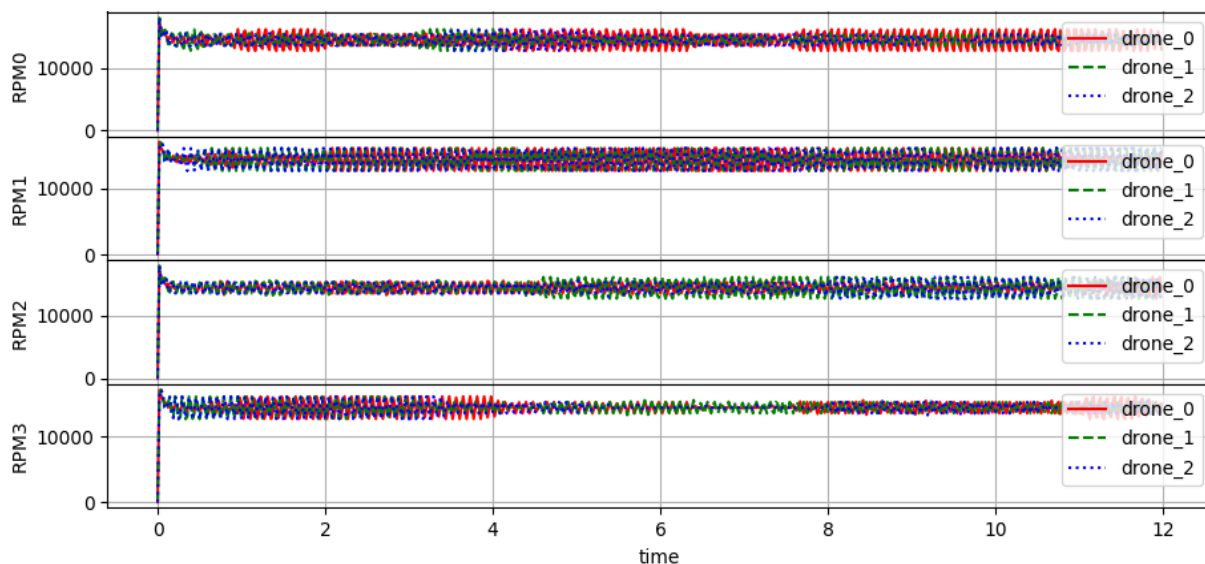


Рис. 7. Скорости вращения двигателей трех квадрокоптеров

В целом по результатам первой сессии вычислительного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- PID-контроллер успешно удерживает траекторию, но с небольшими отклонениями, которые корректируются в процессе полета;
- присутствуют колебания параметров, особенно в угловых скоростях, но не превышают

критических значений, что говорит о стабильности системы;

- скорость в зависимости от высоты ведет себя ожидаемо: при стабилизации по вертикальной оси линейная скорость равна нулю, что подтверждает успешное удержание высоты.

Целью проведения второй сессии вычислительного эксперимента являлось исследование влияния нисходящих воздушных потоков, создаваемых одним квадрокоптером, на движение другого квадрокоптера, находящегося ниже.

В качестве основных входных условий при проведении второй сессии вычислительного эксперимента (расчетная схема на рис. 8) приняты следующие характеристики:

- в симуляции участвуют два квадрокоптера, движущиеся вдоль оси X-Z в противоположных направлениях;

- квадрокоптеры имеют разную высоту полета: один летит на высоте 1 метр, а второй — на высоте 0,5 метра;

- управление осуществляется PID-контроллером (DSLPIControl), который регулирует движение обоих дронов;

- физическая модель PyBullet с эффектом downwash (Physics.PYB_DW) используется для учета аэродинамических взаимодействий.

Выходными параметрами второй сессии вычислительного эксперимента являются следующие данные:

- траектории движения дронов, которые позволяют оценить, как эффект аэродинамических взаимодействий (downwash) влияет на движение нижнего квадрокоптера;

- скоростные характеристики позволяют анализировать влияние вихревых потоков на изменение вертикальной скорости нижнего дрона;

- отклонения от идеальной траектории позволяют оценить, насколько сильным является влияние верхнего дрона.

Этот эксперимент наглядно показывает, как взаимодействие дронов изменяет их поведение в

полете, что особенно важно при разработке алгоритмов координации и управления группами беспилотников.

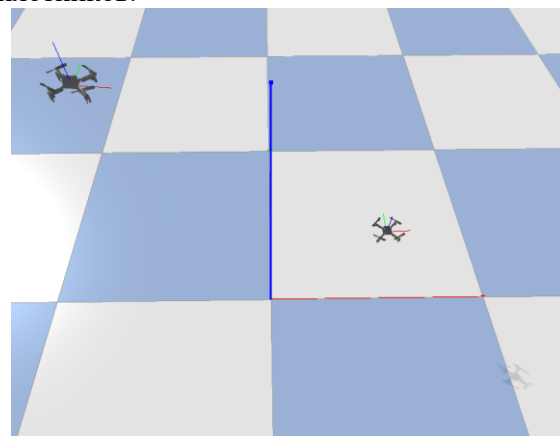


Рис. 8. Расчетная схема траекторий движения квадрокоптеров второй сессии

На рис. 9 и рис. 10 представлены графики, характеризующие удержание траектории: координатные положения и углы наклона соответственно. График по оси X характеризует движение дронов по синусоидальной траектории, как и было запрограммировано. Однако видны небольшие отклонения в движении нижнего дрона (drone_1), что связано с действием аэродинамического эффекта (downwash). Из графика по оси Z можно сделать вывод, что высота нижнего дрона нестабильна, что обусловлено влиянием вихревых потоков, которые вызывают периодические изменения в его вертикальном положении. По графикам рис.10 можно судить об угловых отклонениях при отработке траектории: крен (r), тангаж (p), рыскание (y). Верхний дрон (drone_0) демонстрирует стабильные углы наклона. Нижний дрон (drone_1) испытывает заметные колебания, особенно по углам тангажа и рыскания. В момент максимального сближения с верхним дроном происходит скачкообразное изменение углов, как следствие влияния воздушных потоков. Таким образом, можно сделать вывод, что нижний квадрокоптер испытывает значительное аэродинамическое воздействие, что приводит к нестабильности его ориентации.

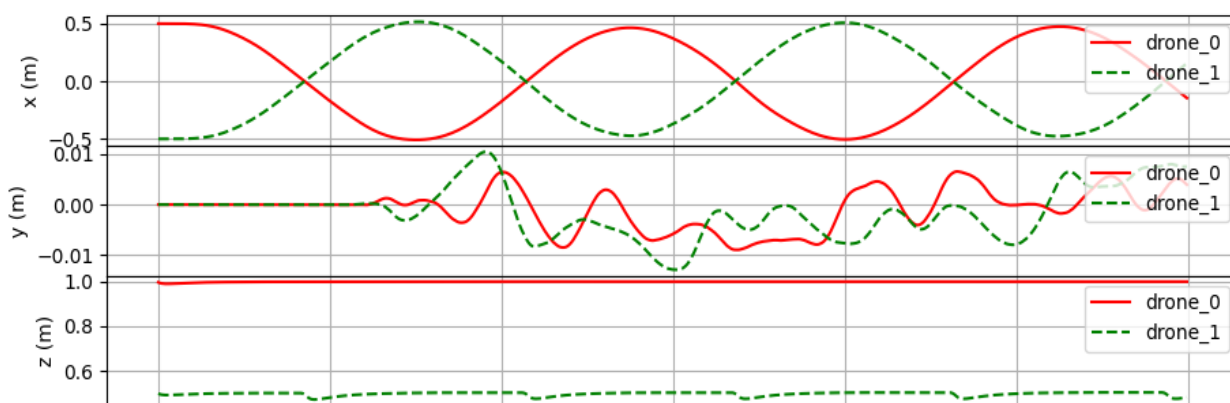


Рис. 9. Траектории движения двух дронов в пространстве

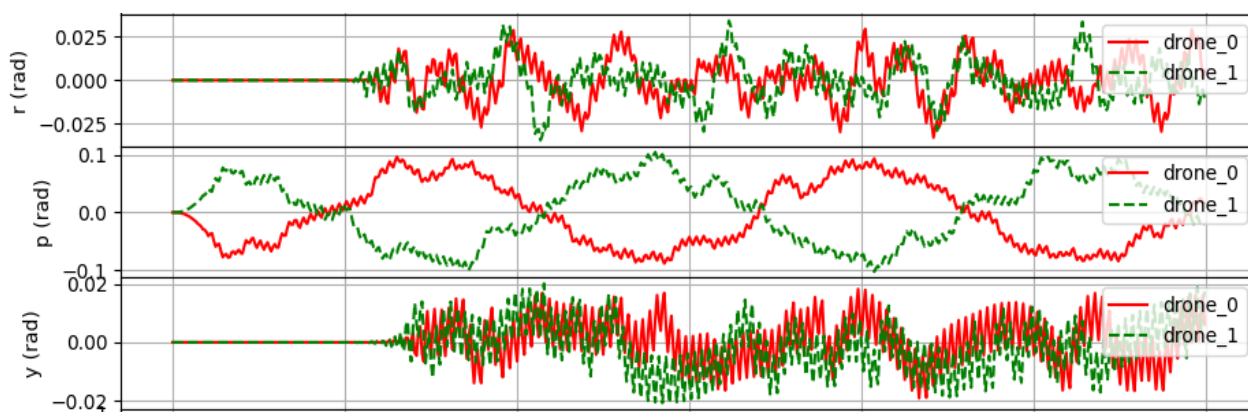


Рис. 10. Углы ориентации двух дронов в пространстве

Графики рис. 11 позволяют оценить влияние аэродинамического эффекта на линейную скорость дронов. Скорости V_x обоих дронов совпадают, что ожидаемо, так как они движутся по синусоиде. Относительно скорости V_z наблюдаются всплески отрицательной скорости у нижнего дрона, когда он проходит под верхним дроном. Это подтверждает, что он теряет подъемную

силу из-за нисходящих потоков. Верхний дрон при этом не испытывает значительных изменений в вертикальной скорости. Таким образом, можно сделать вывод, что аэродинамический эффект замедляет подъем нижнего дрона, вызывая кратковременные потери высоты.

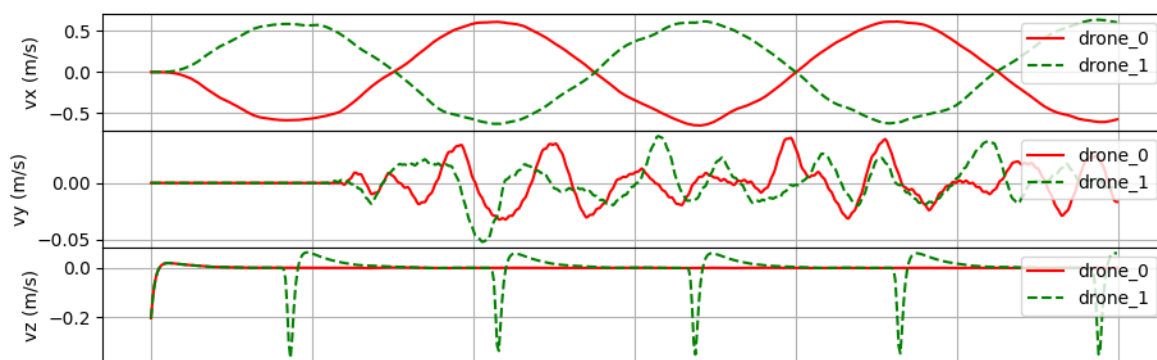


Рис. 11. Линейные скорости движения двух квадрокоптеров

Графики рис.12 позволяют оценить влияние совместного движения на работу моторов дронов. В моменты прохождения нижнего дрона под верхним видны пики скорости роторов, что является следствием работы алгоритма управления, который компенсирует потерю подъемной силы,

увеличивая мощность двигателей. В остальное время значения RPM остаются стабильными и синхронизированными между двумя дронами, контроллер корректирует работу моторов, компенсируя влияние вихревых потоков.

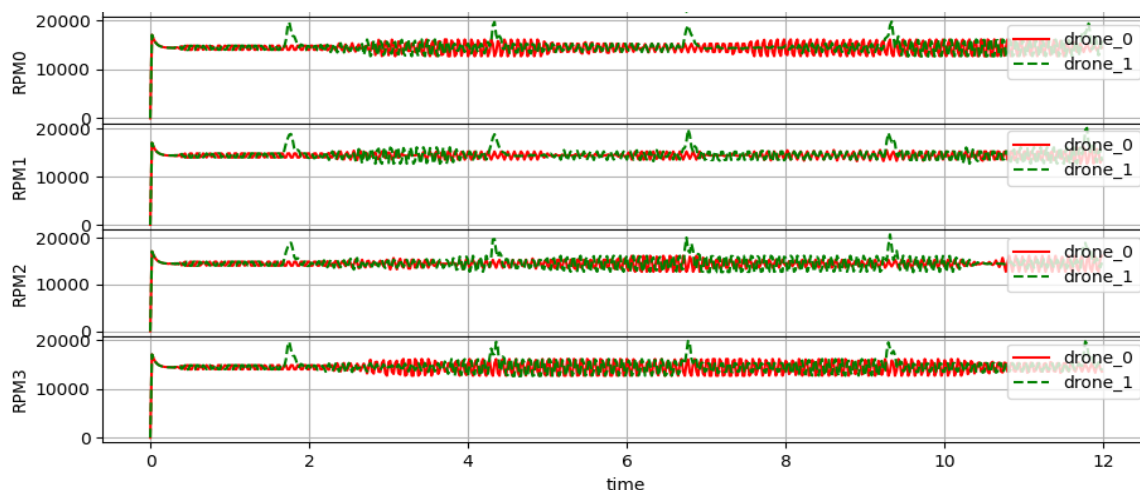


Рис. 12. Скорости вращения двигателей двух квадрокоптеров

Результаты второй сессии вычислительного эксперимента подтверждают заметное влияние нисходящих потоков (downwash effect) на нижний квадрокоптер. Этот эффект приводит к неустойчивости высоты (скачки на графике Z), колебаниям углов ориентации (особенно тангаж и рыскание), дополнительной нагрузке на моторы (скачки RPM), снижению подъемной силы у нижнего дрона (падение Vz).

Эти данные важны при разработке алгоритмов управления многоагентными системами дронов, так как позволяют учитывать аэродинамические эффекты и корректировать управление для предотвращения неустойчивости.

Выводы. В данной работе проведено моделирование динамики движения группы квадрокоптеров с использованием симуляционной среды gym-bullet-drones. В рамках вычислительного эксперимента были исследованы две ключевые задачи: анализ эффективности PID-контроллера при управлении группой дронов, движущихся по круговой траектории в плоскости X-Y и исследование влияния аэродинамических эффектов (downwash effect) на движение дронов, летящих на разных высотах.

Результаты первой сессии эксперимента показали, что PID-контроллер успешно поддерживает заданную траекторию движения квадрокоптеров, обеспечивая их стабильное положение и скорость. Однако были выявлены небольшие отклонения, вызванные корректирующими действиями контроллера и влиянием аэродинамических эффектов. Анализ графиков движения, углов ориентации и скоростей дронов подтвердил, что контроллер эффективно стабилизирует систему, минимизируя ошибки и обеспечивая предсказуемое поведение аппаратов.

Во второй сессии эксперимента исследовано влияние нисходящих воздушных потоков, создаваемых верхним дроном, на движение нижнего аппарата. Полученные данные демонстрируют, что эффект downwash оказывает значительное влияние на стабильность полета нижнего квадрокоптера, вызывая периодические изменения его высоты, углов ориентации и увеличенную нагрузку на моторы. Данные эффекты были зафиксированы в виде скачков скорости вращения двигателей, а также временных потерь подъемной силы, что подтверждает необходимость учета аэродинамических взаимодействий при проектировании систем управления группами беспилотных аппаратов.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает эффективность среды gym-bullet-drones для моделирования и анализа динамики квадрокоптеров в условиях реального

аэродинамического воздействия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами, а также при оптимизации параметров контроллеров для обеспечения стабильности и точности движения дронов в сложных сценариях.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта РНФ «Интеллектуальное управление интегрированными и автономными роботизированными системами на основе данных с обеспечением надежности и безопасности» (соглашение № 24-49-02073).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дрозд О.В., Бордюгов С.И. Функциональное моделирование испытательного стенда беспилотных летательных аппаратов // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. №12. С. 52–56. DOI: 10.18127/j20700784-201912-08.
2. Харченко В.П., Кузьменко Н.С. Минимизация отклонений траектории беспилотного летательного аппарата во время облета препятствий сложной формы // Вестник Национального Авиационного Университета. 2012. Т. 2. №51. С. 18–21.
3. Сурмин В.И., Аникеев Е.А. Оптимизация маршрутов и управления траекториями беспилотных летательных аппаратов с помощью алгоритмов искусственного интеллекта // Моделирование информационных систем и технологий: материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 2 апреля 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2024. С. 448–454. DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_448-454.
4. Воронов С.В., Дементьев В.Е., Логинов С.С. Разработка алгоритмов и программных средств управления беспилотным летательным аппаратом // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. КИИ-2014: труды конференции, Казань, 24–27 сентября 2014 года. Т. 3. Казань: РИЦ «Школа», 2014. С. 249–255.
5. Набиев Т.К., Шиманчук Д.В. Расчёт траекторий движения группы БПЛА в строю // Процессы управления и устойчивость. 2024. Т. 11. №1. С. 121–128.
6. Вагизов М.Р., Хабаров С.П., Соловьев И.Б. Клиент-серверная архитектура модели системы формирования программных траекторий движения БПЛА // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. №2(42). С. 22–29.
7. Шашихин В.Н., Мерзляков К.Д. Синтез стабилизирующего управления квадрокоптером

на основе линейных матричных неравенств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23. №7. С. 376–383. DOI: 10.17587/mau.23.376-383.

8. Вольников М.И. Моделирование движения беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2023. №3(21). С. 42–48. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48.

9. Гиргидов Р.А. Имитационное моделирование роя с использованием произведения Адамара // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2023. №3. С. 10–22. DOI: 10.55959/MSU/0137-0782-15-2023-47-3-10-22.

10.Малинина Н.В. Управление БПЛА при помощи искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. 2021. №32. С. 1408–1418.

11.Liu C.K., Negrut D. The role of physics-based simulators in robotics // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2021. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1146/annurev-control-072220-093055.

12.Song Y., Naji S., Kaufmann E., Loquercio A., Scaramuzza D. Flightmare: A flexible quadrotor simulator // Proceedings of the 4th Conference on Robot Learning. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2009.00563.

13.Panerati J., Zheng H., Zhou S., Xu J., Prorok A., Schoellig A.P. Learning to Fly — a Gym Environment with PyBullet Physics for Reinforcement Learning of Multi-agent Quadcopter Control // arXiv preprint. 2021. Vol. 2103.02142. DOI: 10.48550/arXiv.2103.02142.

14.Badia A.P., Piot B., Kapturowski S., Sprechmann P., Vitvitskyi A., Guo Z.D., Blundell C.

Agent57: Outperforming the Atari human benchmark // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. 2020. Vol. 119. Pp. 507–517. DOI: 10.48550/arXiv.2003.13350.

15.Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Свиридова И.В. Методика настройки оптимальных параметров ПИД-регулятора для управления траекторией беспилотного летательного аппарата с использованием нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. №3. С. 115–121. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017.

16.Доржиев А.С. Обучение с подкреплением для беспилотных летательных аппаратов // Научные тенденции: вопросы точных и технических наук: сборник научных трудов по материалам XXIX международной научной конференции, Санкт-Петербург, 12 июля 2020 года. Санкт-Петербург: Центр Научных Публикаций Международной Объединенной Академии Наук, 2020. С. 5–8. DOI: 10.18411/sciencepublic-12-07-2020-02.

17.Неретин Е.С., Головин Д.А., Сухомейло Н.Я. Разработка математической модели задачи поиска и сопровождения объекта группой беспилотных летательных аппаратов с применением глубокого обучения с подкреплением // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации, Иркутск, 12–13 октября 2023 года. Иркутск: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2023. С. 282–290.

18.Powers C., Mellinger D., Kumar V. Quadrotor Kinematics and Dynamics // Springer Netherlands. 2015. Pp. 307–328. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_71.

Информация об авторах

Дуюн Иван Александрович, студент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl_bgstu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.02.2025 г.

© Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А., 2025

*Duyun I.A., Duyun T.A., Rybak L.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

*E-mail: duyun77@mail.ru

MODELING THE DYNAMICS OF A DRONE GROUP USING THE OPEN GYM-PYBULLET-DRONES PLATFORM

Abstract. This study examines the gym-pybullet-drones simulation environment as a tool for modeling quadcopter dynamics and developing control algorithms. Two scenarios were simulated: the movement of a drone group along a circular trajectory using a PID controller and the study of aerodynamic effects (downwash effect) on quadcopters flying at different altitudes. The analysis showed that the PID controller ensures stable trajectory tracking, but in the presence of external disturbances such as aerodynamic effects, corrective oscillations in motion parameters were observed. The investigation of downwash effects demonstrated a significant impact on the lower quadcopter, leading to altitude fluctuations, orientation angle variations, and changes in motor rotation speeds. The results confirm the feasibility of using gym-pybullet-drones for evaluating and optimizing drone control systems, which is particularly relevant for the development of multi-agent unmanned aerial vehicle systems.

Keywords: quadcopters, modeling, PID controller, simulation environment, gym-pybullet-drones, machine learning, drone control, downwash effect, aerodynamic effects, multi-agent systems.

REFERENCES

1. Drozd O.V., Bordyugov S.I. Functional Modeling of a Test Stand for Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Modern Radioelectronics*. 2019. No. 12. Pp. 52–56. DOI: 10.18127/j20700784-201912-08. (rus)
2. Kharchenko V.P., Kuzmenko N.S. Minimization of UAV Trajectory Deviations During Obstacle Avoidance. *Bulletin of the National Aviation University*. 2012. Vol. 2. No. 51. Pp. 18–21. (rus)
3. Surmin V.I., Anikeev E.A. Optimization of UAV Route Planning and Trajectory Control Using Artificial Intelligence Algorithms. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Modeling of Information Systems and Technologies"*, Voronezh, 2024. Pp. 448–454. DOI: 10.58168/MoInSyTe2024_448-454. (rus)
4. Voronov S.V., Dementiev V.E., Loginov S.S. Development of Algorithms and Software Tools for UAV Control. *Proceedings of the 14th National Conference on Artificial Intelligence with International Participation*, Kazan, 2014. Vol. 3. Pp. 249–255. (rus)
5. Nabiev T.K., Shimanchuk D.V. Calculation of Group UAV Trajectories in Formation. *Control Processes and Stability*. 2024. Vol. 11. No. 1. Pp. 121–128. (rus)
6. Vagizov M.R., Khabarov S.P., Solovyev I.B. Client-Server Architecture of a UAV Trajectory Formation System. *Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law*. 2022. No. 2(42). Pp. 22–29. (rus)
7. Shashikhin V.N., Merzlyakov K.D. Synthesis of Stabilizing Control of a Quadcopter Based on Linear Matrix Inequalities. *Mechatronics, Automation, Control*. 2022. Vol. 23. No. 7. Pp. 376–383. DOI: 10.17587/mau.23.376-383. (rus)
8. Volnikov M.I. Modeling the Motion of Unmanned Aerial Vehicles. *Automation and Modeling in Design and Control*. 2023. No. 3(21). Pp. 42–48. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-3-42-48. (rus)
9. Girgidov R.A. Simulation of a Drone Swarm Using Hadamard Matrices. *Bulletin of Moscow University. Series 15: Computational Mathematics and Cybernetics*. 2023. No. 3. Pp. 10–22. DOI: 10.55959/MSU/0137-0782-15-2023-47-3-10-22. (rus)
10. Malinina N.V. UAV Control Using Artificial Intelligence. *Innovations. Science. Education*. 2021. No. 32. Pp. 1408–1418. (rus)
11. Liu C.K., Negrut D. The Role of Physics-Based Simulators in Robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2021. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.1146/annurev-control-072220-093055.
12. Song Y., Naji S., Kaufmann E., Loquercio A., Scaramuzza D. Flightmare: A Flexible Quadrotor Simulator. *Proceedings of the 4th Conference on Robot Learning*. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2009.00563.
13. Panerati J., Zheng H., Zhou S., Xu J., Prorok A., Schoellig A.P. Learning to Fly – a Gym Environment with PyBullet Physics for Reinforcement Learning of Multi-Agent Quadcopter Control. *arXiv preprint*. 2021. Vol. 2103.02142. DOI: 10.48550/arXiv.2103.02142.
14. Badia A.P., Piot B., Kapturowski S., Sprechmann P., Vitvitskyi A., Guo Z.D., Blundell C. Agent57: Outperforming the Atari Human Benchmark. *Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning*. 2020. Vol. 119. Pp. 507–517. DOI: 10.48550/arXiv.2003.13350.

15. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Sviridova I.V. Methodology for Optimizing PID Controller Parameters for UAV Trajectory Control Using Neural Networks. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2024. Vol. 20. No. 3. Pp. 115–121. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.3.017. (rus)

16. Dorzhiev A.S. Reinforcement Learning for Unmanned Aerial Vehicles. Scientific Trends: Issues of Exact and Technical Sciences. Proceedings of the XXIX International Scientific Conference, St. Petersburg, 2020. Pp. 5–8. DOI: 10.18411/sciencepublic-12-07-2020-02. (rus)

17. Neretin E.S., Golovin D.A., Sukhomeyeilo N.Ya. Development of a Mathematical Model for Object Search and Tracking by a UAV Group Using Deep Reinforcement Learning. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference on Civil Aviation, Irkutsk, 2023. Pp. 282–290. (rus)

18. Powers C., Mellinger D., Kumar V. Quadrotor Kinematics and Dynamics. Springer Netherlands. 2015. Pp. 307–328. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1_71.

Information about the authors

Duyun, Ivan A. Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rybak, Larisa A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.02.2025 г.

Для цитирования:

Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А. Моделирование динамики движения группы дронов с применением открытой платформы GYM-PYBULLET-DRONES // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 137–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148

For citation:

Duyun I.A., Duyun T.A., Rybak L.A. Modeling the dynamics of a drone group using the open GYM-PYBULLET-DRONES PLATFORM. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 137–148. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-5-137-148