

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

3

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**

№ 3, 2025 год

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

Vol. 3. 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	10.03.2025
Выход в свет	24.03.2025

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,85. Уч.-изд. л. 18.13. Тираж 35 экз. Заказ №26

© 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:	10.03.2025

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

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

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

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

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

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

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

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

Ледяйкин Н.В.

МИКРООРГАНИЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ
В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ЗДАНИЯХ

8

Петров А.А., Попов А.Л., Фёдоров А.В.

ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ И КОМПОЗИЦИОННОМ
ВЯЖУЩЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА

17

Василькин А.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФРИКЦИОННОГО
СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СРЫВЕ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

30

Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д.

ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

40

**Трубаев П.А., Кошлич Ю.А., Белоусов А.В., Буханов Д.Г., Гребеник А.Г.,
Прасол Д.А.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ
ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ

49

Фонсека Э.А.Г., Романов О.С.

ФЛОРИЗМ: ОБЪЕДИНЕНИЕ БИОМИМЕТИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ
С РАЗНООБРАЗНЫМИ ЦВЕТОЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ

68

Аслямов А.А., Щур С.Ю., Zubov A.Г.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗОН ОСТАНОВОК НАЗЕМНОГО
ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

82

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

**Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Лисняк В.В., Бондарева И.А., Морозова Н.А.,
Тарасов И.А.**

ОЦЕНКА ДЕФЛОКУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИСПЕРСАНТОВ РАЗЛИЧНОЙ
ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

95

Новоселов А.Г., Никитина М.А., Дреер Ю.И., Таралло З.В., Мануйлов В.Е.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ
ПРИ СИНТЕЗЕ КАЛЬЦИЕВО-АЛЮМОФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА

107

Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМЗИТОВОГО ГРАВИЯ
ПОЛУСУХИМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ
И МАЛО ПЛАСТИЧНОГО СЫРЬЯ

117

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б.

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

125

Таранюк И.В., Слободюк А.П., Фоменко Ю.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ
ЗОНЫ УСТАНОВОК ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

136

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Ledyaykin N.V.

MICROORGANISMS ON THE SURFACE OF STRUCTURES
IN LIVESTOCK BUILDINGS

8

Petrov A.A., Popov A.L., Fedorov A.V.

LIGHTWEIGHT CONCRETE ON A POROUS AGGREGATE AND A COMPOSITE
BINDER USING NATURAL ZEOLITE

17

Vasilkin A.A.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SLIP FACTOR STEEL BOLTED CONNECTIONS

30

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D.

SMOKE STACK INDUSTRIAL SAFETY EXPERT REVIEW

40

**Trubaev P.A., Koshlich Iu.A., Belousov A.V., Bukhanov D.G., Grebenik A.G.,
Prasol D.A.**

RESEARCH OF GEOTHERMAL HEAT PUMP UNIT EFFICIENCY IN CLIMATIC
CONDITIONS OF RUSSIAN REGIONS

49

Fonseka E.A.G., Romanov O.S.

FLORISM: FUSING BIOMIMETIC ARCHITECTURE WITH DIVERSE FLOWER
STRUCTURES

68

Aslyamov I.A., Shchur S.Y., Zubov A.G.

PRINCIPLES FOR ORGANIZING STOP ZONES FOR GROUND PUBLIC TRANSPORT
IN ST. PETERSBURG

82

CHEMICAL TECHNOLOGY

**Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Lisnyak V.V., Bondareva I.A., Morozova N.A.,
Tarasov I.A.**

DEFLOCCULATING ABILITY EVALUATION OF DIFFERENT CHEMICAL

95

Novoselov A.G., Nikitina M.A., Dreer Yu.I., Tarallo Z.V., Manuylov V.E.

STUDY OF THE EFFECT OF IMPURITY COMPOUNDS ON PHASE FORMATION
IN THE SYNTHESIS OF CALCIUM-ALUMOFERRITE CLINKER

107

Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF EXPANDED GRAVEL
BY SEMI-DRY METHOD USING TECHNOGENIC WASTE AND LOW PLASTIC
RAW MATERIALS

117

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Lukyanov E.A., Mpengele E.B., Alkhalili Alak S.B.

CREATION OF A VIRTUAL SENSOR FOR MODELING INERTIAL NAVIGATION
SYSTEMS

125

Taranyuk I.V., Slobodyuk A.P., Fomenko Yu.V.

RESEARCH CONCENTRATION OF HARMFUL SUBSTANCES IN THE WORKING
AREA AIR OF LASER CUTTING UNITS METALS

136

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-8-16

Ледяйкин Н.В.

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

МИКРООРГАНИЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ЗДАНИЯХ

Аннотация. Показано, что эффективными методами повышения долговечности материалов в условиях воздействия микробиологических сред, является модификация биодобавками их составов, а также обработка поверхности изделий биоцидными препаратами.

Объектом изучения являются композиты, изготовленные из сухой цементной штукатурной смеси и антисептических добавок типа «Санатекс. Универсал», «Антиплесень. Лакра», «DALI® Универсальный антисептик». Цель работы состоит в изучении видового состава микробиологической среды на поверхности цементных композитов с разными биоцидными добавками и установление эффективности их действия. Модификация образцов материалов осуществлялась двумя методами. В одном случае биоцидный препарат вводился вготавливаемую композицию, состоящую из сухой смеси и воды, а во втором затвердевшие бездобавочные образцы пропитывались биоцидной добавкой. Испытуемые материалы экспонировались в течение 6 месяцев в условиях воздушной среды животноводческого здания. Путём проведения биологических исследований определён видовой состав микроорганизмов заселившихся на поверхности образцов.

Результаты микробиологических исследований приведены в табличной форме. Выявлена микробиологическая эффективность применяемых биоцидных препаратов. Установлено, что при каждом методе изготовления образцов лучшие показатели были достигнуты с добавкой «Санатекс. Универсал». В этом случае находится минимальное количество заселившихся и развивающихся микроорганизмов.

Ключевые слова: цементные защитные покрытия, микробиологическая среда, бактерии, плесневые грибы, биоцидные добавки.

Введение. Повышение долговечности строительных материалов является одной из важных задач, решение которой имеет актуальный характер и требует систематических исследований. Долговечность бетонов и других цементных композитов зависит от их состава, структуры, вида и качества составляющих материалов, а также характера и интенсивности внешних агрессивных воздействий. Дegradaция свойств цементных композитов под действием микробиологических сред, относится к одному из сложных видов коррозии, приводящей материалы, изделия и конструкции, изготовленные на их основе, к достаточно быстрому разрушению.

Биологическая коррозия представляет собой процесс деструкции строительных материалов, изделий и конструкций, который протекает в результате заселения и развития живых микроорганизмов на их поверхности [1–5]. На физико-механические свойства, декоративные показатели строительных материалов (бетон, штукатурка, дерево), оказывают воздействие преимущественно такие микроскопические организмы как, плесневые грибы и бактерии [6–10].

Биологическая коррозия строительных материалов наблюдается на предприятиях пищевой промышленности и агропромышленного ком-

плекса, где присутствуют в зданиях и сооружениях органические среды. Благоприятными условиями жизнедеятельности микроорганизмов, вызывающих биокоррозию в животноводческих помещениях, являются наличие аммиака, жиров, белков, растворов солей, а также повышенная влажность и температура [4, 11, 12].

Поддержание требуемого микроклимата на животноводческих предприятиях считается важным для обеспечения долговечности строительных материалов. Его формирование складывается из множества факторов, таких как, условий окружающей среды, объемно-планировочных решений зданий, теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, производительности систем вентиляции, вида животных, их количества, эффективности соблюдения санитарных требований при содержании и уходе за ними. Повышенная температура, наличие в воздушной среде пыли, высокая влажность, недостаток солнечного света всё это является благоприятной средой для роста и развития микроорганизмов в виде плесени, грибов, патогенных микромицетов и бактерий, вызывающих не только биодеструкцию материалов конструкций и технологического оборудования, но и различные заболевания животных и людей [13–16]. При слабой скорости движения воздушных масс и застоя воздуха воздушной среды происходит снижение

уровня кислорода. Большая плотность животных в помещениях увеличивает количество аммиака, углекислого газа, что также способствует возникновению плесени. Наличие в помещениях животноводческой фермы сероводорода, углекислого газа и аммиака вызывает отравления, способствует снижению продуктивности и прироста массы, а также появлению различных заболеваний животных, таких как пневмония, отёк легких и др. [17].

Как правило, выделяют два основных случая развития процессов биологической коррозии [3]. В первом случае происходит непосредственное механическое воздействие микроорганизмов с поверхностью материала конструкции, приводящее к снижению прочностных показателей и ухудшению эксплуатационных характеристик. Во втором – биодеструкторы выделяют в процессе жизнедеятельности вещества, которые являются агрессивными по отношению к строительным материалам.

Не допустить наступления биологической коррозии гораздо проще и дешевле, чем в дальнейшем пытаться исправить её последствия. Для защиты строительных композитов от воздействия микроорганизмов применяются различные методы и средства защиты, выбираемые в зависимости от вида биодеструкторов и условий эксплуатации конструкции [18 – 21]. Действенным методом профилактики биокоррозии является изоляция поверхности цементных композитов биостойкими защитными покрытиями – штукатурками, красками, облицовка плиткой.

В настоящее время на отечественном и зарубежном рынке представлено большое число биоцидных добавок, которые можно применять для модификации составов цементных композитов, бетонов и других, а также защитных покрытий как на этапе приготовления смеси (растворной,

бетонной и т.д.), так и при обработке поверхностей материалов, изделий и конструкций [1, 20, 22].

Благодаря использованию биоцидных препаратов достигается увеличение биостойкости цементных строительных материалов и повышение долговечности строительных конструкций [23].

Цель исследования заключалась в определении видового состава биодеструкторов на образцах цементных композитов, выдержанных в эксплуатационных условиях животноводческого помещения и установлении эффективности модифицирующих биоцидных добавок.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработать составы цементных композитов, модифицированных различными видами биоцидных добавок;
- выявить видовой состав микроорганизмов, заселившихся на поверхности исследуемых образцов, выдержанных в течение 6 месяцев в воздушной среде животноводческого помещения;
- охарактеризовать идентифицированные потенциальные биодеструкторы цементных композитов, эксплуатирующихся в условиях микробиологического воздействия.

Материалы и методы

В качестве вяжущего материала при изготовлении цементных защитных покрытий применялась сухая цементная смесь марки «Axton». Модификацию цементных композиций осуществляли следующими биоцидными добавками: «Санатекс. Универсал», «Антиплесень. Лакра», «DALI. Универсальный антисептик». Основные характеристики, используемых биоцидных добавок, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные данные по биоцидным добавкам

Наименование добавки	Характеристика	Плотность, г/см ³	Изготовитель
«Санатекс. Универсал»	Прозрачная слабоокрашенная жидкость	1,0–1,01	ООО «Тиккурила»
«DALI® Универсальный антисептик»	Бесцветная жидкость	1,0	ООО НПП Рогнеда
«Антиплесень. Лакра»	Водный раствор сополимеров гексаметиленгуанидина	1,0	ООО «Лакра Синте»

Модификацию цементных композитов осуществляли двумя способами. При первом способе биоцидные добавки вводились в количествах 2,5 %, 5 % и 7,5 % от массы вяжущего с водой затворения непосредственно в составы композиций при их приготовлении. Водоцементное отношение в композициях было постоянным и

равным 0,3. При втором способе модификации препараты наносили на поверхность образцов, путём их двухкратного погружения в 100 % раствор биоцида. За контрольный состав был принят бездобавочный цементный композит без обработки поверхности. Разработанные составы для исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Составы для исследований

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

Для проведения эксперимента было изготовлено 39 образцов размером $1 \times 1 \times 3$ см по 3 образца каждого состава. Изготовленные образцы после отверждения в нормальных температурно-влажностных условиях (28 суток), выдерживались в течение 6 месяцев в животноводческом помещении. Помещение здания фермы, в котором экспонировались образцы, имеет площадь 150 м^2 с содержанием 30 крупнорогатых животных, являлось неотапливаемым с системой вентиляции.

Животноводческая ферма находится на территории Республики Мордовия, где преобладает умеренно континентальный климат, для которого характерна холодная морозная зима и умеренно жаркое лето. На рисунке 1 приведены средние значения температуры в животноводческом помещении, в котором выдерживались образцы на основе цементных композитов.

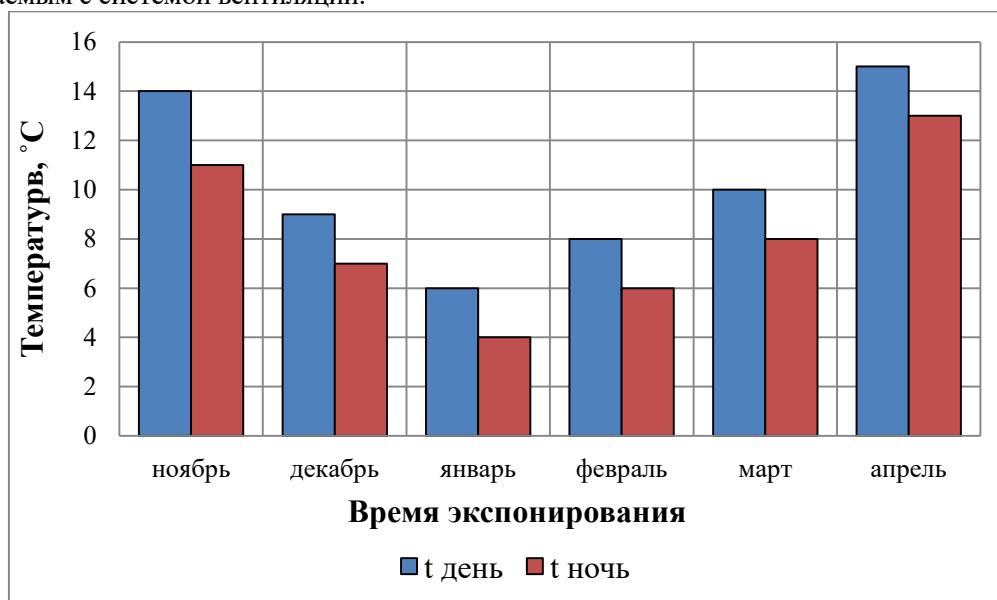


Рис. 1. Средние значения температуры в период экспонирования защитных штукатурных покрытий в животноводческом помещении

Для определения видового состава биоструктуров образцы после экспонирования в условиях животноводческой фермы, были исследованы в специализированной лаборатории на предмет бактериологического изучения смывов. С поверхности исследуемых композитов делались смывы, с которых выполнялся посев в чашки

Петри с питательной средой, содержащей мясопептонный агар (МПА). После их выдерживания в термостате в течении 48 ч при температуре 37°C , выполнялась окраска по Граму, результат которой позволяют выявить наличие грамположительных и грамотрицательных бактерий.

Наличие таких микроорганизмов, как грибы, исследовали на предметном стекле, покрытым покровным стеклом. Приготовленные препараты для исследования бактерий изучали при увеличении 1600х, для грибов – 640х. Виды бактерий определяли с использованием справочника Берджи по бактериологической систематике [24, 25].

Экспериментальные результаты и их анализ

По результатам эксперимента был определен видовой состав микроорганизмов, идентифицированных с поверхности экспонированных образцов цементных защитных покрытий, в зависимости от метода модификации и количества биоцидных добавок, который приведен в таблице 3.

Таблица 3

Видовой состав микроорганизмов на поверхности образцов

№ Состав	Видовой состав микроорганизмов	
	Бактерии	Мицелиальные грибы
0	Грамотрицательные короткие палочки, расположенные одиночно и грамотрицательные бактерии сферической формы (кокки, диплококки, тетракокки)	гриб рода <i>Mucor</i>
1	Грамотрицательные мелкие палочки, расположенные одиночно и цепочкой	–
2	Грамотрицательные короткие толстые и грамотрицательные длинные палочки, расположенные парно и одиночно	–
3	Грамотрицательные мелкие палочки, расположенные парно и цепочкой	–
4	Грамотрицательные длинные, тонкие палочки, расположенные одиночно	–
5	Грамотрицательные мелкие палочки расположенные, одиночно, парно и цепочкой	–
6	Грамотрицательные короткие палочки, расположенные парно и цепочкой	–
7	Грамотрицательные длинные, тонкие палочки и грамотрицательные мелкие палочки, расположенные одиночно и парно	–
8	Грамотрицательные мелкие палочки, расположенные одиночно и грамотрицательные бактерии сферической формы (кокки, диплококки)	гриб рода <i>Mucor</i>
9	Грамотрицательные короткие небольшие палочки, расположенные одиночно	–
10	Грамотрицательные мелкие палочки расположенные парно и цепочкой	–
11	Грамотрицательные толстые, короткие палочки расположенные одиночно и парно	–
12	Грамотрицательные мелкие палочки, расположенные одиночно, парно, цепочкой и бактерии сферической формы (кокки, тетракокки)	гриб рода <i>Mucor</i>

Бактериологический анализ позволил выявить на поверхности цементных образцов, преимущественно грамотрицательные палочки, бактерии сферической формы: кокки, диплококки и грибы рода *Mucor* (таблица 3).

Некоторые идентифицированные грамотрицательные палочковидные бактерии, вероятнее всего, согласно справочнику Берджи по бактериологической систематике, входят в группу факультативно анаэробных грамотрицательных палочек. Диаметр клетки у них может изменяться от 0,1 до 1,5 мкм. Данные микроорганизмы достаточно хорошо себя

чувствуют при температуре 37 °С, что может являться признаком возможной патогенности выявленных штаммов [24, 25]. Многие виды палочек являются безвредными, одни для человека и животных, другие для растений и насекомых. Из-за биохимических процессов некоторые бактерии могут стать причиной появления биоповреждений в материале (раствор, бетон), например, грамотрицательные палочки родов *Escherichia*, *Salmonella* и *Proteus* [26].

Небольшие грамотрицательные палочки, могут быть отнесены к группе аэробных хемоли-

тогетеротрофных бактерий и родственных организмов, которые по морфологическим признакам относятся к микроорганизмам рода *Thiobacillus*, входящих в подгруппу бесцветных сероокисляющих бактерий, в секцию менее своеобразных морфологически сероокисляющих бактерий. Размер клеток составляет $\sim 0,5 \times 1,0 - 4,0$ мкм, некоторые виды могут быть подвижными за счет полярных жгутиков. В род *Thiobacillus* входят два типа организмов – облигатные аэробы и факультативные денитрификаторов. Температурный оптимум для них составляет $20 - 43$ °C, степень кислотности pH изменяется от 2 до 8. Распространены данные бактерии повсеместно, в том числе, в пресной воде, почве, преимущественно при большой концентрации окисляемых соединений серы. Данные бактерии благодаря окислению соединений сыры и в последующем образования H_2SO_4 могут привести к деградации штукатурных покрытий [24].

На поверхности составов №0 (контрольный, бездобавочный), №8 (добавка «Антиплесень. Лакра»), №12 (добавка «DALI® Универсальный антисептик») микробиологическое исследование выявило наличие бактерий сферической формы, которые по определителю бактерий Берджи, могут быть отнесены к группе грамотрицательных, аэробных/микроаэрофильных палочек и кокков. Большинство бактерий из данной группы растут в атмосферных условиях, где уровень кислорода (O_2) составляет 21 %. Микроорганизмы некоторых родов могут фиксировать молекулярный азот [25]. Грамотрицательные кокки, вероятнее всего может относиться к роду *Paracoccus*. Бактерии данного рода представлены клетками сферической формы (диаметр составляет $0,5 - 0,9$ мкм), а также короткими палочками (длина составляет $0,9 - 1,2$ мкм). Они могут располагаться парой, группой или одиночно. Данные микроорганизмы являются неподвижными аэробами (метаболизм бактерий чисто дыхательного типа). Оптимальная температура роста для них составляет $25 - 30$ °C, встречаются, как правило, в почве, а также, в природной и искусственной рапе [1]. Представители данного рода могут принимать участие в биодеградации защитных покрытий и бетона.

Выделенные грибы, на поверхности составов №0 (контрольный), №8 (биоцидный препарат «Антиплесень. Лакра»), №12 (биоцидный препарат «DALI® Универсальный антисептик») относятся к виду *Mucor hiemalis* (род *Mucor*). Оптимальной температурой для роста представителей данного вида является $20 - 30$ °C и pH приблизительно 6. Данные микроорганизмы могут обитать в самых различных условиях окружающей среды и географических местоположениях [10]. В поисках питательной среды гифы плесени могут

проникать в штукатурку, бетон, кирпич, и в дальнейшем приводить материалы к деградации. Образование гриба на составах №8, №12, вероятно, произошло, по причине того, что антисептик не вводился непосредственно в штукатурную смесь, а лишь поверхность образцов обрабатывалась добавками «Антиплесень. Лакра» и «DALI Универсальный антисептик».

Анализируя вышесказанное, можем предположить, что обработка поверхности биоцидными добавками является менее эффективным способом защиты штукатурных материалов, по сравнению с составами, в которых они непосредственно вводились в состав.

Выводы

В результате микробиологического исследования цементных композитов в животноводческом здании были идентифицированы: грамотрицательные палочковидные бактерии, кокки, диплококки, грибы рода *Mucor*, заселившиеся на поверхности образцов.

В ходе эксперимента была изучена биостойкость составов защитных покрытий. Выявлены наиболее эффективные биоцидные свойства у препарата «Санатекс. Универсал», поскольку и при введении его непосредственно в штукатурную смесь в разных концентрациях и при поверхностной обработке образцов, микробиологический анализ не выявил наличие плесневых грибов.

Антисептические добавки «Антиплесень. Лакра» и «DALI Универсальный антисептик» также препятствует развитию микроорганизмов в строительных материалах бактериальной и грибковой природы, но только при условии, что антисептик будет вводиться раствор, так как при поверхностной обработке композитов он менее устойчив к биопоражениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ледяйкин Н.В., Ледяйкина О.В. Изучение основных биодеградаторов штукатурных образцов при их экспозиции в условиях воздействия ультрафиолетового облучения и температурно-влажностных факторов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1 (20). С. 91–96. DOI:10.51608/26867818_2023_1_91.
2. Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Дергунова А.В., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Родин А.И. Методы оценки потерь от биоповреждений и расчет расходов на защиту зданий и сооружений // Материалы VII Московского международного конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития». М.: ЗЛО «Экспо-биохим-технологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. 332 с.

3. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Семичева А.С., Морозов Е.А. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2001. 196 с.
4. Sand W.; Microbial corrosion and its inhibition. In: Rehm H.J. (Ed.), Bio-technology, Vol. 10, 2nd ed., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001. Pp. 267–316.
5. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Смирнов В.Ф. Влияние старения вяжущих на их биологическую стойкость Аннотация // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2 (14). С. 213–217.
6. Ерофеева И.В. Исследование грибостойкости и фунгицидности цементных композитов в среде мицелиальных грибов // Русский инженер. 2018. № 2 (59). С. 44–47.
7. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. 2014. С. 708–716.
8. Videla H.A., Herrera L.K.; Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. International Microbiology. Vol. 8. No. 3. 2005. Pp. 169–180.
9. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Калашников В.И., Ерофеева И.В., Смирнов В.Ф. Биостойкость декоративных цементных композитов // Вестник Приволжского территориального отделения РААСН. 2016. № 19. С. 304–308.
10. Ледяйкин Н. В., Ледяйкина О. В., Зоткина М. М. Микробиологическое исследование штукатурных композитов в условиях повышенной влажности и постоянной температуры / Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал // Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУАОВО «АГАСУ», 2022. № 4 (42). С. 39–46. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-42-4-39-46
11. Jana D., Lewis R.A.; Acid attack in a concrete sewer pipe – a petrographic and chemical investigation. Proc. 27th Int. Conf. Cement Microscopy, ICMA, Victoria, Canada, 2005.
12. Elchishcheva T. F, Lediaikina O. V, Lediaikin N. V, Rodin A. I. Species Composition of Microorganisms in the Air Above the Samples of Cement Composites // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2612. No. 1. Pp.40013–40013. <https://doi.org/10.1063/5.0113758>
13. Booth G.H. Microbiological corrosion. London: Mills and Boon Ltd. 1971. 63 p.
14. De Belie N., Richardson M., Braam CR., Svennerstedt B., Lenehan J.J., Sonck B.; Durability of building materials and components in the agricultural environment: Part I, The agricultural environment and timber structures // Journal of Agricultural Engineering Research. 2000. 75. Pp. 225–241.
15. Alum A. Cement-based biocide coatings for controlling algal growth in water distribution canals // Cement & Concrete Composites. 2008. Vol. 30(9). Pp. 839–847.
16. Ерофеев В.Т., Богатова С.Н., Богатов А.Н. Исследование биостойкости строительных материалов, модифицированных биоцидными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 48–53.
17. Теплякова Н.А., Омельченко Е.В. Вредное воздействие плесени и плесневых грибов на человека // Молодой ученый. 2016. №18-1 (122.1). С. 23–25.
18. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Дергунова А.В., Сураева Е.Н., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Капушин С.Н. Биологическая и климатическая стойкость цементных композитов // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 3. С. 119–126.
19. Дергунова А.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Завалишин Е.В. Повышение биостойкости строительных материалов и изделий посредством пропитки их пористой структуры // Известия Казанского государственного архитектурно-строит. ун-та. 2010. № 2(14). С. 218–222.
20. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
21. Ерофеев В.Т., Комохов П.Г., Смирнов В.Ф., Светлов Д.А. Защита зданий и сооружений от биоповреждений биоцидными препаратами на основе гуанидина // под ред. П.Г. Комохова, В.Т. Ерофеева, Г.Е. Афиногенова. Изд. 2-е, испр. – Санкт-Петербург: Наука, 2010. 189 с.
22. Гусев Б.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф., Дергунова А.В., Богатов А.Д. Разработка способов повышения биостойкости строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2012 №4. С. 52–58.
23. Ерофеев В.Т., Калашников В.И., Смирнов В.Ф., Карпушин С.Н., Родин А.И., Красноглазов А.М., Челмакин А.Ю. Стойкость цементных композитов на биоцидном портландцементе с активной минеральной добавкой в условиях воздействия модельной среды бактерий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 1. С. 11–17.
24. Определитель бактерий Берджи. Том 1 / под. ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стэйли, С. Уильямса // пер. с англ. под ред. акад. РАН Г.А. Заварзина. М.: Мир, 1997. 429 с.

25. Определитель бактерий Берджи. Том 2 / под. ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уильямса // пер. с англ. под ред. акад. РАН Г.А. Заварзина. М.: Мир, 1997. 368 с.

26. Cwalina B. Biodeterioration of Concrete. Architecture Civil Engineering Environment. 2008. No. 1. Pp. 133–140.

Информация об авторах

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

Поступила 07.10.2024 г.

© Ледяйкин Н.В., 2025

Ledyaykin N.V.

National Research Mordovian State University named after N. P. Ogarev

E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru

MICROORGANISMS ON THE SURFACE OF STRUCTURES IN LIVESTOCK BUILDINGS

Abstract. It is shown that effective methods of increasing the durability of materials under the influence of microbiological media are modification of their compositions with dietary supplements, as well as surface treatment of products with biocidal preparations.

The object of study is composites made of dry cement plaster mixture and antiseptic additives of the Sanatex type. Universal", "Antiplesen. Lacra", "DALI ® A universal antiseptic." The purpose of the work is to study the species composition of the microbiological environment on the surface of cement composites with various biocidal additives and to establish the effectiveness of their action. Modification of the material samples was carried out by two methods. In one case, a biocidal preparation was introduced into a prepared composition consisting of a dry mixture and water, and in the second, the solidified additive-free samples were impregnated with a biocidal additive. The test materials were exposed for 6 months in the air environment of the livestock building. By conducting biological studies, the species composition of microorganisms settled on the surface of the samples was determined. The results of microbiological studies are presented in tabular form. The effectiveness of the applied biocidal preparations has been revealed. It was found that for each method of sample production, the best performance was achieved with the addition of Sanatex. Universal". In this case, there is a minimum number of settled and developing microorganisms.

Keywords: cement protective coatings, microbiological environment, bacteria, mold fungi, biocidal additives.

REFERENCES

1. Ledyaykina O.V., Ledyaykin N.V. The study of the main biodestructors of plaster samples during their exposure to ultraviolet radiation and temperature and humidity factors [Izucheniye osnovnykh biodestruktorov shtukaturnykh obraztsov pri ikh ekspozitsii v usloviyakh vozdeystviya ultrafioletovogo oblucheniya i temperaturno-vlazhnostnykh faktorov]. Expert: theory and practice. 2023. Vol. 20. No. 1. Pp. 91–96. (rus)

2. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Dergunova A.V. Bogatov A.D., Kaznacheyev S.V. Rodin A.I. Methods for assessing losses from biological damage and calculating the cost of protecting buildings and structures [Metody otsenki poter ot biopovrezhdeniy i raschet raskhodov na zashchitu zdaniy i sooruzheniy]. Materialy VII Moskovskogo mezhdunarodnogo kongressa "Biotekhnologiya: sostoyaniye i per-

spektivy razvitiya". M.: ZLO "Expo-Biochim Technologies", RXTU name D. I. Mendeleeva, 2013. 332 p.

3. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biological resistance of materials [Biologicheskoye soprotivleniye materialov]. Saransk: Mordovian University Press, 2001. 196 p. (rus)

4. Sand W.; Microbial corrosion and its inhibition. In: Rehm H.J. (Ed.), Bio-technology, Vol. 10, 2nd ed., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001. Pp. 267–316.

5. Erofeev V.T., Bogatov A.D., Bogatova S.N., Smirnov V.F. The effect of aging of binders on their biological resistance Abstract [Vliyaniye stareniya vyazhushchikh na ikh biologicheskuyu stoykost Annotatsiya]. Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2010. Vol. 14. No. 2. Pp. 213–217. (rus)

6. Erofeeva I.V. Investigation of fungal resistance and fungicidal properties of cement composites in the environment of mycelial fungi [Issledovaniye gribostoykosti i fungitsidnosti tsementnykh kompozitov v srede mitselialnykh gribov]. Russian Engineer. 2018. Vol. 59. No. 2. Pp. 44–47. (rus)
7. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, assessment and forecasting. [Biokorroziya tsementnykh betonov. osobennosti iye razvitiya. otsenki i prognozirovaniya]. Basic research. 2014. Pp. 708–716. (rus)
8. Videla H.A., Herrera L.K.; Microbiologically influenced corrosion: looking to the future. International Microbiology. Vol. 8. No. 3. 2005. Pp. 169–180.
9. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kalashnikov V.I., Erofeeva I.V., Smirnov V.F. Biostability of decorative cement composites [Biostoykost dekorativnykh tsementnykh kompozitov]. Bulletin of the Volga territorial branch of the RAASN. 2016. No. 19. Pp. 304–308. (rus)
10. Ledyaykin N.V., Ledyaykina O.V., Zotkina M.M. Microbiological study of plaster composites under conditions of high humidity and constant temperature [Mikrobiologicheskoye issledovaniye shtukaturnykh kompozitov v usloviyakh povyshennoy vlazhnosti i postoyannoy temperatury]. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region: scientific and technical journal. Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering. Astrakhan: GAOUAOVO "AGASU", 2022. Vol. 42. No. 4. Pp. 39–46. (rus)
11. Jana D., Lewis R.A. Acid attack in a concrete sewer pipe – a petrographic and chemical investigation. Proc. 27th Int. Conf. Cement Microscopy, ICMA, Victoria, Canada, 2005.
12. Elchishcheva T.F., Lediaikina O.V., Lediaikin N.V., Rodin A.I. Species Composition of Microorganisms in the Air Above the Samples of Cement Composites. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2612. No. 1. Pp. 40013–40013.
13. Booth G.H. Microbiological corrosion. London: Mills and Boon Ltd. 1971. 63 p.
14. De Belie N., Richardson M., Braam C.R., Svennerstedt B., Lenehan J.J., Sonck B.; Durability of building materials and components in the agricultural environment: Part I, The agricultural environment and timber structures. Journal of Agricultural Engineering Research. 2000. 75. Pp. 225–241.
15. Alum A. Cement-based biocide coatings for controlling algal growth in water distribution canals. Cement & Concrete Composites. 2008. Vol. 9. No. 30. Pp. 839–847.
16. Erofeev V.T., Bogatova S.N., Bogatov A.N. Study of the biostability of building materials modified with biocidal additives [Issledovaniye biostoykosti stroitelnykh materialov. modifitsirovannykh biotsidnymi dobavkami]. Industrial and civil construction. 2018. No. 8. Pp. 48–53. (rus)
17. Teplyakova N.A., Omelchenko E.V. Harmful effects of mold and mold fungi on humans [Vrednoye vozdeystviye pleseni i plesnevykh gribov na cheloveka]. Young scientist. 2016. Vol. (122.1). No. 18-1. Pp. 23–25. (rus)
18. Erofeev V.T., Rodin A.I., Dergunova A.V., Suraeva E.N., Smirnov V.F., Bogatov A.D., Kaznacheev S.V., Kapushin S.N. Biological and climatic resistance of cement composites [Biologicheskaya i klimaticheskaya stoykost tsementnykh kompozitov]. Academia. Architecture and construction. 2016. No. 3. Pp. 119–126. (rus)
19. Dergunova A.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Zavalishin E.V. Increasing the biostability of building materials and products by impregnating their porous structure [Povysheniye biostoykosti stroitelnykh materialov i izdeliy posredstvom propitki ikh poristoy struktury]. News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2010. Vol. 14. No. 2. Pp. 218–222. (rus)
20. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. On modern methods of ensuring the durability of reinforced concrete structures [O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksiy]. Academia. Architecture and construction. 2015. No. 1. Pp. 93–102. (rus)
21. Erofeev V.T., Komokhov P.G., Smirnov V.F., Svetlov D.A. Protection of buildings and structures from biodamage with biocidal preparations based on guanidine [Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot biopovrezhdeniy biotsidnymi preparatami na osnove guanidine]. St. Petersburg: Science, 2010. 189 p. (rus)
22. Gusev B.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Dergunova A.V., Bogatov A.D. Development of methods for increasing the biostability of building materials [Razrabotka sposobov povysheniya biostoykosti stroitelnykh materialov]. Industrial and civil construction. 2012. No. 4. Pp. 52–58. (rus)
23. Erofeev V.T., Kalashnikov V.I., Smirnov V.F., Karpushin S.N., Rodin A.I., Krasnoglazov A.M., Chelmakin A.Yu. Resistance of cement composites based on biocidal Portland cement with an active mineral additive under exposure to a model bacterial environment [Stoykost tsementnykh kompozitov na biotsidnom portlandtsemente s aktivnoy mineralnoy dobavkoy v usloviyakh vozdeystviya modelnoy sredy bakteriy]. Industrial and civil construction. 2016. No. 1. Pp. 11–17. (rus)
24. Hout J., Krieg N., Smith P., Staley J., Williams S. Burgee's Bacteria Determinant [Opredelitel

bakteriy Berdzhii]. Volume 1. M.: World, 1997. 429 p. (rus)

25. Hoult J., Krieg N., Smith P., Staley J., Williams S. Burgee's Bacteria Determinant [Opredelitel

bakteriy Berdzhii]. Volume 2. M.: World, 1997. 368 p. (rus)

26. Cwalina B. Biodeterioration of Concrete. Architecture Civil Engineering Environment. 2008. No. 1. Pp. 133–140.

Information about the authors

Ledyaykin, Nikita V. Postgraduate student at the Department of Construction Materials and Technologies. E-mail: nikita.1234.nikita@mail.ru. National Research Mordovian State University named after. N. P. Ogareva, Institute of Architecture and Construction. Russia, 430000, Saransk, st. Sovetskaya, 24

Received 07.10.2024

Для цитирования:

Ледяйкин Н.В. Микроорганизмы на поверхности конструкций в животноводческих зданиях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-8-16

For citation:

Ledyaykin N.V. Microorganisms on the surface of structures in livestock buildings. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

Петров А.А., *Попов А.Л., Фёдоров А.В.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

*E-mail: surrukin@gmail.com

ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ И КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА

Аннотация. В статье рассмотрена и экспериментально подтверждена возможность использования пористого заполнителя и композиционного вяжущего ТМЦ-85 для улучшения физико-механических характеристик легкого бетона. Методом матричного двухфакторного планирования осуществлен подбор предварительных составов пеноцеолитбетона (ПЦБ). Получены соответствующие уравнения регрессии, по которым построены соответствующие номограммы. Установлено, что увеличение массового содержания золошлаковых отходов в составе композиционного вяжущего приводит к повышению В/Ц. Прочность ПЦБ возрастает при уменьшении массового содержания золошлака. Достижение оптимальных прочностных характеристик достигается при увеличении концентрации пористого заполнителя и понижении В/Ц, что может объясняться тем, что пористые агрегаты заполнителя прочнее пористой матрицы бетона. Пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и увеличении плотности матрицы. На основе проведенных экспериментальных исследований, а также полученных физико-механических свойств предварительных составов ПЦБ, осуществлен подбор оптимального состава ПЦБ с ТМЦ-85. Установлена и предложена модель оптимального структуроформирования легкого бетона на пористом заполнителе. Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе и предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F100, теплопроводность в сухом состоянии составило $\lambda = 0,27$ (Вт/м·°C), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам.

Ключевые слова: легкий бетон, композиционное вяжущее, цеолит, пористый заполнитель, золошлак.

Введение. Производство легкобетонных изделий занимает значительную часть рынка строительных материалов в России. Использование легких бетонов способствует снижению массы зданий, улучшает теплоизоляционные и звукоизоляционные показатели, уменьшает затраты на транспортировку и монтаж, а также снижает общую стоимость строительства [1].

В Республике Саха (Якутия) действует стратегия социально-экономического развития до 2032 года с определением целевого видения до 2050 года, утвержденная Правительством Республики с 2019 года, согласно которой имеется план развития мероприятий по созданию производств высококачественных ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов, изделий и конструкций. Для Западной Якутии, в частности Сунтарского улуса, ставится задача по разработке карьеров по добыче цеолита, выпуску пористых заполнителей для строительных нужд сроком до 2032 года. Исходя из этого проявляется интерес в использовании пористых заполнителей для получения новых энергоэффективных строительных материалов на основе местной минеральной сырьевой базы.

Проблема экономии энергоресурсов в условиях устоявшейся тенденции роста тарифов на

энергоносители, а также ужесточений нормативных требований к тепловой оболочке зданий [2], предопределяет к строительным материалам высокие показатели энергоэффективности с оптимальной себестоимостью [3], а также обуславливает расширение номенклатуры технологически и экономически эффективных разновидностей вяжущих, обеспечивающих получение высококачественной продукции [4]. В Якутии активно развивается производство пористого заполнителя на основе цеолита Хонгуриинского месторождения (пеноцеолит). Пеноцеолит, как пористый заполнитель, имеет ряд ключевых преимуществ, такие как низкий коэффициент теплопроводности [5] высокая морозостойкость [6], что делает его идеальным для использования в суровых климатических условиях. Однако его применение в качестве заполнителя для получения легких бетонов с высокими теплотехническими и прочностными показателями остается малоизученным. Учитывая значительный объем золошлаковых отходов, образующийся в результате работы твердотопливных котельных Якутии, представляется целесообразным исследовать возможность их применения в качестве сырья для производства легкого бетона, что позволит решить проблему утилизации отходов и повысить теплотехнические харак-

теристики материала. Согласно данным Территориального органа ФСГС по Республике Саха (Якутия) действует 567 твердотопливных котельных, работающих на каменных и бурых углях. За длительный отопительный сезон вырабатывается колоссальное количество золошлаковых отходов, которые можно использовать для изготовления строительных материалов.

Перспективой решения данной проблемы являются легкие бетоны на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием местного природного цеолита с добавлением золошлаковых отходов, которые могут оказать положительное влияние на теплотехнические [7–11], технологические [12–16], экологические [17] и прочностные свойства материала [18].

Целью работы является разработка оптимального способа получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями с использованием пористого заполнителя местного производства, композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгуруу и золошлаковыми отходами.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Оптимизация пористости легкого бетона на основе анализа влияния объемной концентрации заполнителя и массовой доли золошлака на прочность легкого бетона путем проведения матричного двухфакторного планирования эксперимента;
2. Определение состава и технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего для получения требуемых эксплуатационных свойств.
3. Определение модели оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе;

Методология. В работе для получения пеноцеолитбетона (ПЦБ) на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Якутцемент» (табл. 1). В качестве мелкого плотного заполнителя использовался песок речной из поймы р. Лена, соответствующий по всем характеристикам группе «очень мелкий» согласно ГОСТ 8736. В качестве крупного заполнителя использовался пористый заполнитель на основе природного цеолита, изготовленный ООО «Сунтарцеолит». Характеристики крупного заполнителя приведены в таблице 2.

Также применены модифицирующие добавки:

– природный цеолит, производимый предприятием по добыче и обогащению природного

цеолита – ООО «Сунтарцеолит» (табл. 2), в измельченном виде до удельной поверхности 500 м²/г обладающий активностью по отношению к СаО (76,6 мг/г).

– отсев золошлаковых отходов производственного цеха ООО «Якутский котловой завод» с фракцией не более 1,0 мм, основными компонентами которого являются оксиды кальция, кремния и алюминия (табл. 3).

– для доведения бетона до требуемой плотности применялся пена с плотностью 70 г/л, получаемой на протеиновом пенообразователе FoamCem с концентрацией 2%.



Рис. 1. Лабораторный пеногенератор с пенопатроном и компрессором

Замешивание смесей осуществлялось на лабораторном смесителе ЛБ-АБ-10 и гравитационном бетоносмесителе СБР132А.

Основные физико-механические характеристики ПЦБ определялись методами испытаний, описанных и регламентируемых межгосударственным стандартом на легкие бетоны ГОСТ 25820-2021.

Для подбора состава бетона в соответствии с ГОСТ 27006-86 (использование данной версии стандарта обусловлено областью применения к конструкционным легким бетонам) на первоначальном этапе проведена оптимизация пористости ПЦБ на основе анализа прочности на сжатие. Для этого было проведено матричное двухфакторное планирование эксперимента, в качестве варьируемых параметров в соответствии с необходимой плотностью и прочностью ПЦБ выбраны объемная концентрация пористого заполнителя для оптимизации макропористости и массовое содержание золошлака для оптимизации микропористости [19]. Результаты описывали через уравнение регрессии (1) с коэффициентом корреляции не менее 0,8.

$$f = y_0 + a \cdot x + b \cdot y + c \cdot x^2 + d \cdot y^2 \quad (1)$$

а



б



Рис. 2. Смесители принудительного действия:
а – ЛБ-АБ-10; б – СБР132А

Таблица 1
Свойства портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н (ОАО «Якутцемент»)

Показатель	Значение
Нормальная густота, %	25
Остаток на сите 008, %	7,0
Равномерность изменения объема, мм	0,11
Сроки схватывания: – начало, час-мин – окончание, час-мин	2–35 3–55
Средняя активность цемента в возрасте 28 суток, МПа	40,95

Таблица 2
Характеристика пористого заполнителя (ООО «Сунтарцеолит»)

Показатель	Значение
Размер зерен, мм	5–20
Насыпная плотность, кг/м ³	245
Средняя плотность	502
Истинная плотность, кг/м ³	2020
Пористость, %	87,8
Водопоглощение, % мас.	22,8
Прочность на сдавливание, МПа	0,83

Таблица 3
Химический состав золошлаковых отходов (ООО «Якутский котловой завод»)

Содержание оксидов, %													
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁻	H ₂ O ⁺	P ₂ O ₅	CO ₂
35,04	0,69	14,96	3,63	1,71	0,02	3,61	20,83	2,57	0,13	0,71	0	0,03	6,22

Процесс изготовления ПЦБ включает предварительную сушку пористых заполнителей, последовательное дозирование и перемешивание компонентов до однородной массы. Перед введением пористого заполнителя и пены определялась подвижность смеси с помощью вискозиметра Суттарда, целевым значением расплыва являлось 18 см. Для достижения марочной прочности в течение 28 суток образцы после распабливания помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой (20±2) °С и относительной влажностью воздуха (95±5) %.

Испытание образцов ПЦБ было выполнено в соответствии со стандартными методиками, с использованием аттестованных приборов и лабораторных установок Инженерно-технического института СВФУ имени М.К. Аммосова. Статистическая обработка экспериментальных данных

была осуществлена при помощи специализированной программы для анализа и визуализации данных.

Основная часть. Исходя из характеристик пористого заполнителя (табл. 2) для получения ПЦБ класса В5 необходимо закладывать плотность не менее D900 [20]. Состав легкого бетона на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего выбран для плотности D900. В работе портландцемент заменен композиционным вяжущим ТМЦ-85. В ранних работах показана эффективность природного цеолита как компонента композиционного вяжущего [21, 22].

Для подбора состава бетона в соответствии с ГОСТ 27006-86 на первоначальном этапе проведена оптимизация пористости легкого бетона на основе анализа прочности на сжатие. Для этого было проведено матричное двухфакторное планирование эксперимента, в качестве варьируемых параметров, в соответствии с необходимой

плотностью и прочностью легкого бетона, выбраны объемная концентрация пористого заполнителя для оптимизации макропористости и массовое содержание золотшлака для оптимизации микропористости (таблица 4). Выбранное соотношение плотности и прочности представляет

собой целевой компромисс, основывающийся на необходимости обеспечения долговечности материала при сохранении его теплотехнических показателей, учитывая особенности климата Якутии.

Таблица 4

Условие планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Объемная концентрация пористого заполнителя (ЦЗ)	x	0,53	0,56	0,59	0,03
Массовое содержание золотшлака (ЗШ) от вяжущего, %	y	7	14	21	7

Таблица 5

Матрица планирования

№ точки плана	Факторы	
	x	y
1	+1	+1
2	+1	0
3	+1	-1
4	0	+1
5	0	0
6	0	-1
7	-1	+1
8	-1	0
9	-1	-1

Таблица 6

Составы ПЦБ D900 на 1 м³

№ п/п	Пористый заполнитель, кг	ТМЦ-85, кг	Пена, л	Золотшлак, кг	Пластификатор, %
1	266	550	60	83	2,7
2			71	55	
3			82	28	
4	252		104	83	
5			115	55	
6			126	28	
7	238		148	83	
8			159	55	
9			170	28	

В лабораторных условиях было приготовлено 9 составов, при каждом значении варьируемых факторов испытывалось по три образца для исключения получения случайных результатов. В соответствии с планом эксперимента, увеличение номера состава сопровождалось уменьшением количества либо пористого заполнителя, либо золотшлака, что приводило бы к постоянному повышению плотности. Однако, для сопоставления влияния различных компонентов на прочность бетона требовалось достижение одинаковой плотности всех образцов. Поэтому для корректировки плотности бетона до необходи-

мого значения и формирования пористой структуры также предусматривалось добавление пеноагента в состав легкого бетона. Так, в составах от №1 до №9, где снижалось содержание пористого заполнителя, увеличивали количество добавляемой пены.

Важной частью технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе является способ замешивания компонентов и вид бетономесителя. Неудовлетворительными оказались смеси, получаемые с помощью лабораторного смесителя ЛС-АБ-10 с плавающими лопастями. Визуально отмечено, что при перемешивании

смеси пенообразователь не образует изолированные пузырьки, наблюдается эффект «гашения» пены, что приводит к вынужденному повышению В/Ц.

Далее приготовление и перемешивание смеси производилось в бетономесителе гравитационного типа и согласно способам, предложенным в источниках под авторством Давидюка А.Н., Сопегина Г.В. и Семейных Н.С. [23, 24]. Подготовка пены производилась с использованием переносного лабораторного пеногенератора, с камерой смешения объемом 40 литров, с пенопатроном и компрессором для подачи сжатого воздуха в дозировке 2% от массы воды. Способ №1 получения ПЦБ подразумевает перемешивание компонентов в следующей последовательности: пеноцеолит вымачивается в 2/3 объема воды затворения в течение 5 минут, далее перемешивается с приготовленной смесью из сухих компонентов (рис. 3). В образовавшуюся смесь вводилась оставшаяся часть 1/3 воды, далее пена. При формовании образцов произошло оседание раствора в нижнюю часть формы (рис. 4). Согласно более классическому способу №2 необходимо изначальное получение растворной смеси с последующей добавкой пористого заполнителя и пены. При этом, согласно наблюдениям, введение пены должно происходить после введения

пористого заполнителя, так как если вводить пористый компонент в пенобетонную смесь, также будет происходить «гашения» пены. Далее в работе приготовление образцов ПЦБ производилось по способу №2.

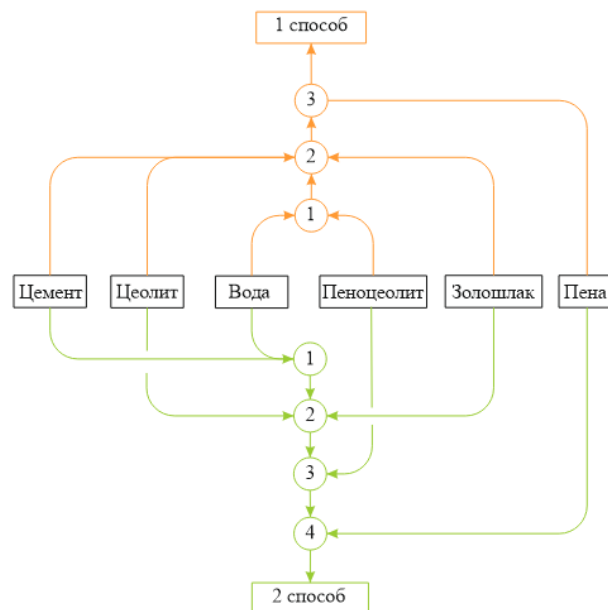


Рис. 3. Способы получения пеноцеолитбетона

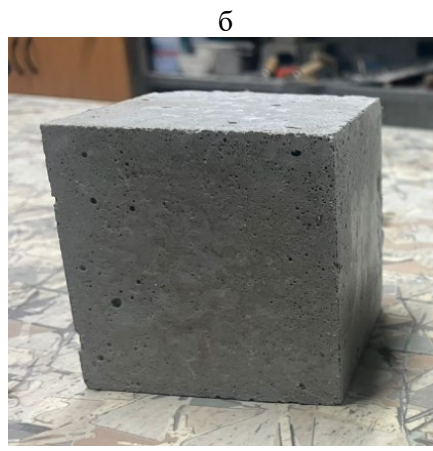
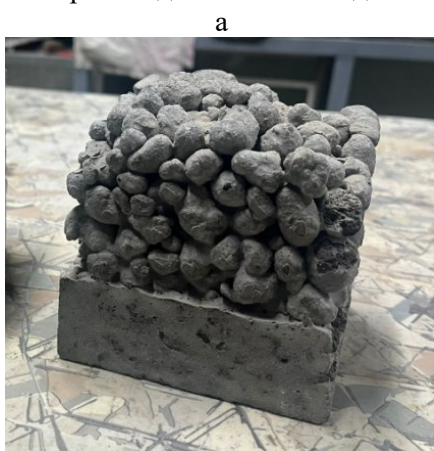


Рис. 4. Лабораторные образцы ПЦБ-бетона размером 100x100x100 мм:
а – способ №1; б – способ №2

На основе данных составов были замешаны серии из трех образцов легкого бетона, физико-механические свойства составов, выдержанных в естественных условиях твердения, приведены в таблице 7.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии зависимостей:

В/Ц отношения от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золошлака (коэффициент корреляции $R^2=0,9$):

$$f = -38,1011 + 131,9129 \cdot ЦЗ + 14,8378 \cdot ЗШ - 106,2566 \cdot ЦЗ^2 - 14,3324 \cdot ЗШ^2 \quad (2)$$

Прочности от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золошлака (коэффициент корреляции $R^2=0,8$):

$$f = -14,6161 + 63,1398 \cdot ЦЗ + 0,1087 \cdot ЗШ - 48,1898 \cdot ЦЗ^2 - 0,0063 \cdot ЗШ^2 \quad (3)$$

Прочности от объемной концентрации пористого заполнителя и В/Ц (коэффициент корреляции $R^2=0,82$):

$$f = -6,1225 + 23,3947 \cdot ЦЗ + 0,005 \cdot ЗШ - 20,4027 \cdot ЦЗ^2 + 0,0003 \cdot ЗШ^2 \quad (4)$$

Таблица 7

Физико-механические свойства составов ПЦБ D900

№ п/п	Объемная концентрация пористого заполнителя	Массовое содержание золотлака от вяжущего, %	Ц/В	В/Ц	Коэффициент конструктивного качества	Прочность на сжатие, МПа
1	0,60	21	1,17	0,85	5,46	4,92
2	0,59	14	1,54	0,65	6,94	6,25
3	0,61	7	1,73	0,58	7,50	6,75
4	0,56	21	1,25	0,80	5,93	5,34
5	0,56	14	1,38	0,72	6,57	5,91
6	0,57	7	1,53	0,65	6,62	5,95
7	0,53	21	1,40	0,71	5,61	5,05
8	0,52	14	1,48	0,68	5,94	5,35
9	0,52	7	1,73	0,58	6,13	5,52

По полученным уравнениям регрессии построены номограммы зависимостей В/Ц и прочности при сжатии в соотношении с массовым со-

держанием золотлака от композиционного вяжущего и объемной концентрации пористого заполнителя (рис. 5, рис. 6).

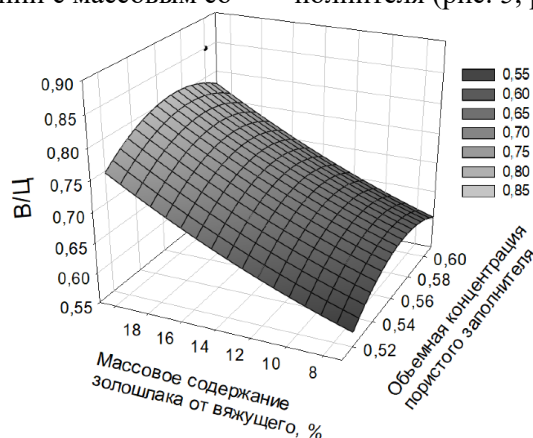


Рис. 5. Зависимость В/Ц от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золотлака от вяжущего

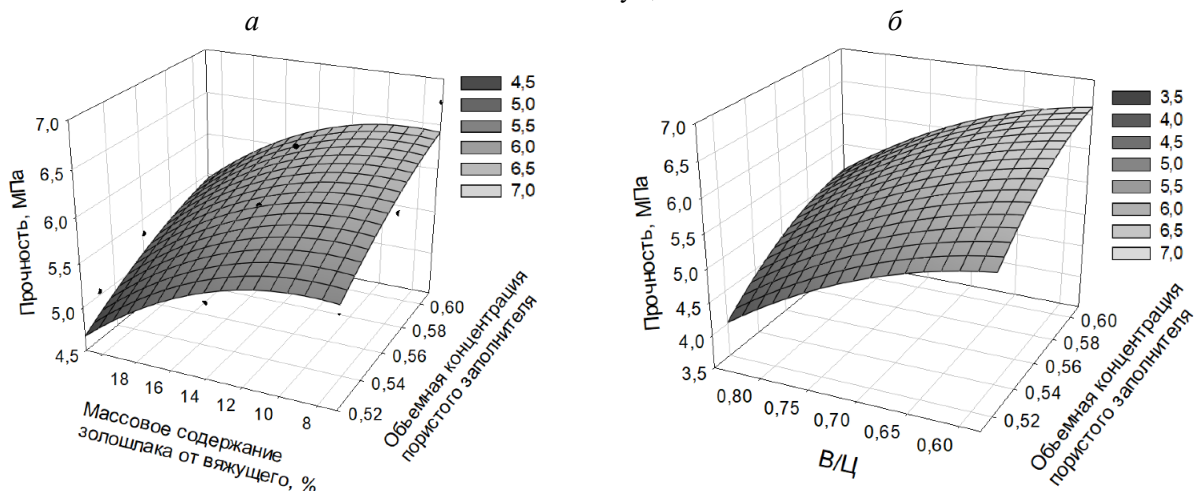


Рис. 6. Зависимости предела прочности при сжатии легкого бетона от объемной концентрации пористого заполнителя, а также:

а – от массового содержания золотлака от вяжущего; б – от В/Ц

В ходе проведения эксперимента установлено (рис. 6), что увеличение массового содержания золошлаковых отходов в составе композиционного вяжущего приводит к повышению В/Ц. Это может быть объяснено тем, что золошлаковые отходы имеют частицы несгоревшего топлива, которые способны в значительной степени поглощать воду [25]. В следствии этого также прочность ПЦБ возрастает при уменьшении массового содержания золошлака. Достижение оптимальных прочностных характеристик достигается при увеличении концентрации пористого заполнителя и понижении В/Ц, что может объясняться тем, что пористые агрегаты заполнителя прочнее пористой матрицы бетона. При этом пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и увеличении плотности матрицы.

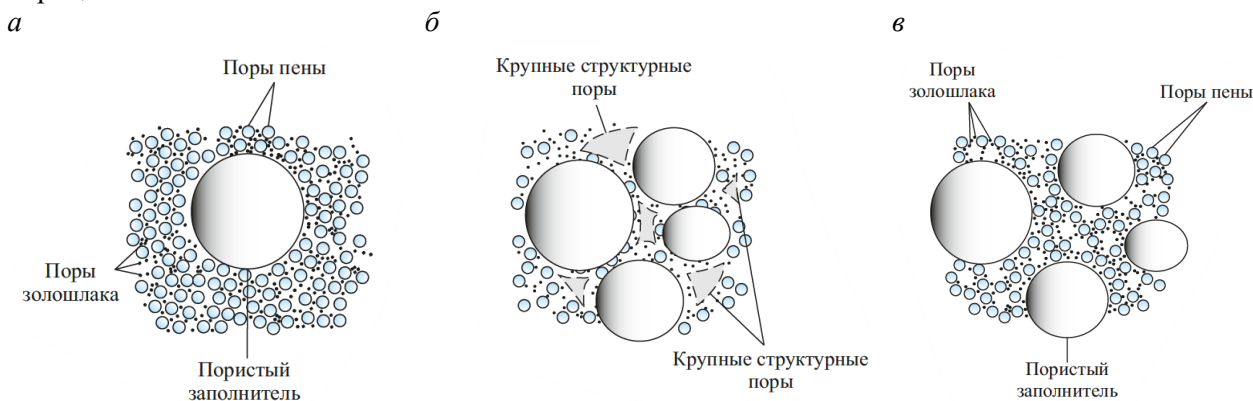


Рис. 7. Модель структуроформирования легкого бетона на пористом заполнителе:

а – высокопористая матрица с низкой концентрацией заполнителя;

б – низкопористая матрица с высокой концентрацией заполнителя;

в – оптимальная пористость матрицы с высокой концентрацией заполнителя

Далее проведен подбор состава бетона по ГОСТ 27006-86 где за варьируемый параметр взято Ц/В отношение. Данные по зависимости Ц/В от прочности взяты из предыдущих испытаний (рис. 8). Предварительные составы, для достижения класса прочности В5, плотности D900

и подвижности ПЗ приведены в таблице 8. При этом для достижения необходимой плотности (веса и объема) дополнительно дозировались молотый цеолит и пена.

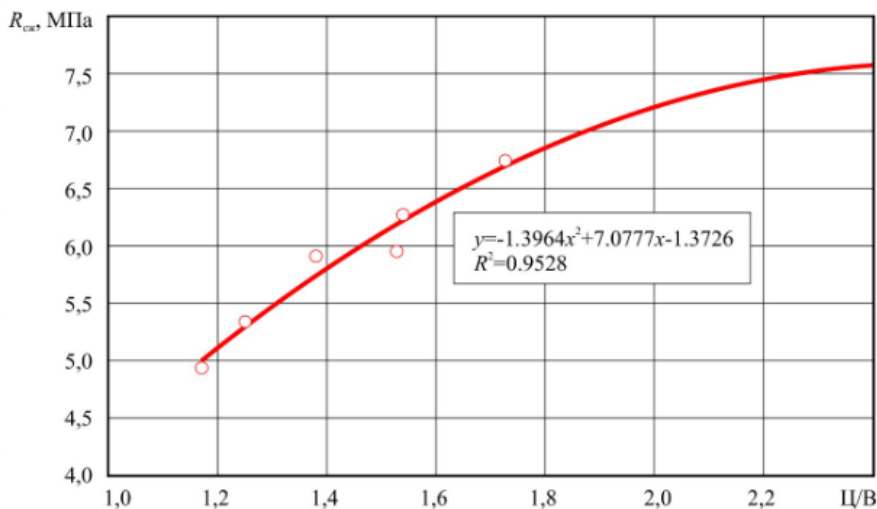


Рис. 8. Зависимость предела прочности при сжатии от цементно-водного отношения

Таблица 8

Составы конструкционно-теплоизоляционного ПЦБ с ТМЦ-85

Номер состава	Маркировка	Ц/В	Вода, кг	ТМЦ-85, кг	Пористый заполнитель, кг	Цеолит, кг	Золотошлаковые отходы, кг	Пена, л	Плотность смеси, кг/м ³
1	B7,5 F100 ПЗ D900	2,1	200	420	265	73	30	70	983
2		2,4		480		27	34	50	997
3		1,8		360		120	26	110	970

Результаты по зависимости прочности легкого бетона от Ц/В также подтверждают предложенную модель оптимального структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе (табл. 9, рис. 9) Существует оптимальное Ц/В,

при котором достигается оптимальная плотность и пористость матрицы легкого бетона, при увеличении Ц/В повышается плотность цементного теста, что приводит по всей видимости к неэффективному распределению пористости.

Таблица 9

Физико-механические свойства составов конструкционно-теплоизоляционных ПЦБ

Номер состава	Маркировка	Средняя плотность бетона (кг/м ³)	Средняя прочность на сжатие на 28 суток твердения (МПа)
1	B7,5 F100 ПЗ D900	903	6,54
2		896	5,6
3		883	6,32

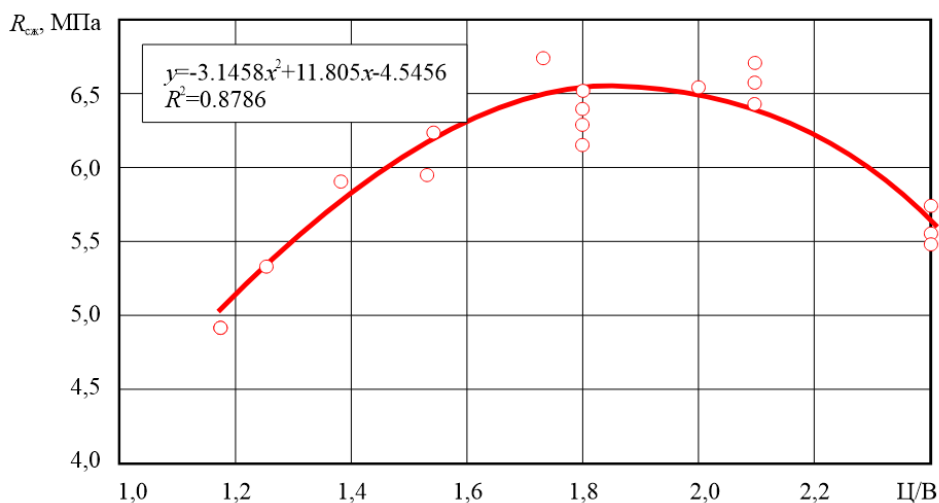


Рис. 9. Зависимость предела прочности при сжатии от цементно-водного отношения опытных образцов ПЦБ с ТМЦ-85

В заключении определен оптимальный состав согласно зависимости и получены технические характеристики в соответствии с ГОСТ 25820-2021 «Бетоны легкие. Технические условия» (табл. 10). Для наглядности состав с ТМЦ-85 был сравнен с составом на портландцементе.

Выводы. Таким образом, установлен оптимальный способ получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями

с использованием пористого заполнителя местного производства и композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгуруу.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимости прочности на сжатие. Установлена и предложена модель оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой для достижения максимальной прочности легкого бетона необходимо закладывать высокую концентрацию

цию пористого заполнителя для обеспечения оптимальной пористости и прочности матрицы легкого бетона. При этом оптимальная пористость и

прочность матрицы легкого бетона достигается при оптимальном Ц/В.

Таблица 10

Оптимальный состав конструкционно-теплоизоляционного ПЦБ

Маркировка		B5 D900 ПЗ F100	
Состав, на 1 м ³	Ц/В	2	
	Вода, кг	200	
	Цемент, кг	400	–
	ТМЦ-85, кг	–	400
	Цеолит, кг	88	88
	Зола, кг	32	32
	Пористый заполнитель, кг	265	
Свойства	Пена, л	83	
	Плотность, кг/м ³	892	861
	Марка по плотности	D900	
	Предел прочности при сжатии, МПа	5,9	6,49
	Класс прочности	B5	
	Марка по морозостойкости	F75	F100
	Теплопроводность, Вт/(м °С)	0,32	0,27

Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой замешивания компонентов легкого бетонной смеси должно начинаться с получения сначала растворной части, затем последовательного введения пористого заполнителя и пены. При этом перемешивание обеспечивается бетономесителем гравитационного типа.

Предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F100, теплопроводность в сухом состоянии $\lambda = 0,27$ (Вт/м·°С), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам. Применение данного материала в строительстве Якутии остается оправданным благодаря прочностно-плотностному балансу. Развитие производства легкого бетона на пористом заполнителе на основе природного цеолита Якутии позволит сократить транспортно-логистические издержки при строительстве, укрепить региональную экономику, повысить долговечность зданий и снизить энергозатраты на эксплуатацию, а также открыть новые возможности для повышения их эффективности и расширения областей применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ризаев Б.Ш., Мамадалиев А.Т., Мухитдинов М.Б. Анализ эффективности использования пористых заполнителей для лёгких бетонов // Экономика и социум. 2022. № 2-1(93). С. 461–467.

2. Корнилов Т.А., Посельский Ф.Ф., Потравный И.М., Попов А.Л., Макаров А.И. Проблемы обеспечения населения Российской Арктики комфортным жильем на примере Республики Саха (Якутия) // ЭКО. 2023. № 12(594). С. 130–149. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-12-130-149.

3. Чередниченко Т.Ф., Тамбовцев А.М., Чеснокова В.Д., Журбенко М.Д. Технологические и экономические аспекты развития индустрии легких бетонов конструкционного назначения // Инженерный вестник Дона. 2021. № 9(81). С. 1–7.

4. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Лесниченко Е.Н., Дребезгова М.Ю. Эффективный ячеистый бетон на композиционном гипсовом вяжущем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 11–18. DOI: 10.34031/article_5db331a5c52049.41127542.

5. Местников А.Е., Семенов С.С., Васильева Д.В. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. №. 12-1. С. 80–84

6. Местников А.Е., Павлов Д.Г. Возможности производства гранулированного пеностеклянного материала в условиях Якутии // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. №. 1-8. С. 32.

7. Сопегин Г.В., Салова П.В. Анализ сырьевых материалов при подборе состава легких бетонов на пористых заполнителях // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2024. Т. 1. С. 143–147.

8. Ткач Е.В., Рахимов А.М. Пеностеклокристаллический пористый заполнитель на основе

техногенных отходов для легких бетонов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 140–148. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-140-148.

9. Крылов С.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях // Аллея науки. 2018. Т. 2, № 1(17). С. 199–201.

10. Дмитриев Н.С., Наруть В.В. Использование крупного заполнителя для повышения эффективности бетонов // Дни студенческой науки : Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры, Москва, 04–07 марта 2019 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 1099–1101.

11. Mahmmoud L.M.R., Dulaimi A., Bernardo L.F.A., Andrade J.M.d.A. Characteristics of Lightweight Concrete Fabricated with Different Types of Strengthened Lightweight Aggregates // Journal of Composites Science 2024. Vol. 8. 144. DOI: 10.3390/jcs8040144

12. Алфимова Н.И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневецкая Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89.

13. Стешенко А.Б., Кудяков А.И., Иноземцев А.С., Иноземцев С.С. Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон для индивидуального монолитного жилищного строительства // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16, № 4. С. 320–328. DOI:10.15828/2075-8545-2024-16-4-320-328.

14. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // Вестник БГТУ. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 122–131. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394.

15. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А. Композиционное вяжущее с использованием алюмосиликатных наполнителей и органических добавок биологического происхождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 6. С. 8–18. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-8-18.

16. Славчева Г.С., Буймарова Т.К. Физико-климатическая стойкость пенобетонов на основе техногенного сырья // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 2(43). С. 124–131. DOI:10.24866/2227-6858/2020-2-13

17. Жаканов А.Н. Природные пористые заполнители легкого бетона // Наука и техника Казахстана. Павлодар: Научный журнал Торайгыров Университета, 2023. С. 155–162. DOI: 10.48081/LRRE9213

18. Строцкий В.Н., Савин В.И., Полетаев В.В. Прочностные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике // Бетон и железобетон. 2023. № 2(616). С. 14–30. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30.

19. Местников А.Е., Федоров В.И. Математическое планирование в проектировании состава легкого бетона // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-1. С. 82–87. DOI: 10.17513/snt.37770.

20. Matveeva O., Baishev N., Makarov A., Popov A., Pavlyukova I., Grigoriev N. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application // Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 1. DOI:10.34910/MCE.125.7.

21. Патент № 2803754 С1 Российская Федерация, МПК C04B 7/13, C04B 28/04, C04B 22/00. Вяжущее для производства легкого бетона / А.Л. Попов, А.В. Федоров; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова". № 2023105155; заявл. 07.03.2023 : опубл. 19.09.2023, Бюл. №26. 6 с.

22. Popov A., Yadrikhinsky V., Mestnikov A. Peculiarities of hydration and frost resistance of cement with natural zeolite additive // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 1(117). DOI: 10.34910/MCE.117.11.

23. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4, № 3(15). С. 375–391. DOI:10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.

24. Давидюк А.Н. Конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях для эффективных ограждающих конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 4(12). С. 72–80.

25. Сопегин Г.В., Семейных Н.С. Подбор состава конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе гранулированного пеностекла с применением аппарата математического планирования эксперимента // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4(55).

Информация об авторах

Петров Айтал Афанасьевич, магистрант кафедры «Прикладная механика и строительное материаловедение». Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Попов Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Прикладная механика и строительное материаловедение». E-mail: surrukin@gmail.com. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Фёдоров Артём Владимирович, старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция». E-mail: crawlrick@gmail.com. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Поступила 28.10.2024 г.

© Петров А.А., Попов А.Л., Фёдоров А.В., 2025

Petrov A.A., *Popov A.L., Fedorov A.V.

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

*E-mail: surrukin@gmail.com

LIGHTWEIGHT CONCRETE ON A POROUS AGGREGATE AND A COMPOSITE BINDER USING NATURAL ZEOLITE

Abstract. The article considers and experimentally confirms the possibility of using a porous aggregate and a composite binder FGC-85 to improve the physical and mechanical characteristics of lightweight concrete. The selection of preliminary compositions of foam zeolite concrete (FZC) was carried out by the method of matrix two-factor planning. The corresponding regression equations are obtained, according to which the corresponding nomograms are constructed. It has been established that an increase in the mass content of ash and slag waste in the composition of a composite binder leads to an increase in W/C . The strength of the FZC increases with a decrease in the mass content of ash slag. Optimal strength characteristics are achieved with an increase in the concentration of porous aggregate and a decrease in W/C , which may be explained by the fact that porous aggregates of aggregate are stronger than the porous matrix of concrete. The peak strength is achieved with an increase in the filler concentration and an increase in the density of the matrix. Based on the conducted experimental studies, as well as the obtained physico-mechanical properties of the preliminary compositions of FZC, the selection of the optimal composition of FZC with FGC-85 was carried out. A model of optimal structuring of lightweight concrete on a porous aggregate has been established and proposed. The technology for producing lightweight concrete on a porous aggregate is determined and the composition of structural and thermal insulation concrete with an average density grade of D900 is proposed, ensuring operational properties: concrete class B5, frost resistance F100, thermal conductivity in dry condition was $\lambda = 0.27$ (W/m·°C), which meets the requirements for structural and thermal insulation lightweight concretes.

Keywords: lightweight concrete, composite binder, zeolite, porous aggregate, ash slag

REFERENCES

1. Rizaev B.Sh., Mamadaliev A.T. Mukhitdinov, M. B. Analysis of the effectiveness of using porous aggregates for light concretes [Analiz effektivnosti ispol'zovaniya poristy'kh zapolnitelej dlya lyogkikh betonov]. Y'konomika i socium. 2022. No. 2-1(93). Pp. 461–467. (rus)
2. Kornilov T.A., Poselsky F.F., Potravny I.M., Popov A.L., Makarov A.I. Problems of providing the population of the Russian Arctic with a comfortable housing on the example of the Republic of Sakha (Yakutia) [Problemy obespecheniya naseleniya Rossijskoj Arktiki komfortnym zhil'em na primere Respubliki Saha (Yakutiya)]. ECO. 2023. No. 12(594). Pp. 130–149. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-12-130-149. (rus)
3. Cherednichenko T.F., Tambovtsev A.M., Chesnokova V.D., Zhurbenko M.D. Technological and economic aspects of the development of the light concrete industry for structural purposes [Tekhnologicheskie i ekonomicheskie aspekty razvitiya industrii legkih betonov konstrukcionnogo naznacheniya]. Engineering Journal of Don. 2021. No. 9(81). Pp. 1–7. (rus)
4. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Glagolev E.S., Lesnichenko E.N., Drebezgova M.Yu. Effective cellular concrete on a composite gypsum binder [Effektivnyj yacheistyj beton na kompozicionnom gipsovom vyazhushchem]. Bulletin of BSTU named

after V.G. Shukhov. 2019. No. 10. Pp. 11–18. DOI: 10.34031/article_5db331a5c52049.41127542. (rus)

5. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasilyeva D.V. Rational use of mineral resources of Yakutia in the technology of building materials [Racional'noe ispol'zovanie mineral'no-syr'evy'kh resursov Yakutii v tekhnologii stroitel'ny'kh materialov]. Fundamental'ny'e issledovaniya. 2017. No. 12-1. Pp. 80–84. (rus)

6. Mestnikov A.E., Pavlov D.G. Possibilities of production of granular foam glass material in Yakutia [Vozmozhnosti proizvodstva granulirovannogo penosteklyannogo materiala v usloviyakh Yakutii]. Sovremennyye tendenczii razvitiya nauki i tekhnologii. 2016. No. 1-8. Pp. 32. (rus)

7. Sopegin G.V., Salova P.V. Analysis of raw materials in the selection of the composition of light concretes on porous aggregates [Analiz syr'evykh materialov pri podbore sostava legkikh betonov na poristyyh zapolnitelyah]. Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. 2024. Vol. 1. Pp. 143–147. (rus)

8. Tkach E.V., Rakhimov A.M. Foam-glass-crystalline porous filler based on man-made waste for light concretes [Penosteklokristallicheskiy poristyj zapolnitel' na osnove tekhnogennykh othodov dlya legkikh betonov]. Building and reconstruction. 2022. No. 6(104). Pp. 140–148. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-140-148. (rus)

9. Krylov S.A. Lightweight concretes on porous aggregates [Legkie betony na poristyyh zapolnitelyah]. Alleya nauki. 2018. Vol. 2, No. 1(17). Pp. 199–201. (rus)

10. Dmitriev N.S., Narut V.V. The use of a large aggregate to increase the efficiency of concrete [Ispol'zovanie krupnogo zapolnitelya dlya povysheniya effektivnosti betonov]. Days of Student Science. Collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture, Moscow, 04-07 March 2019. – Moscow: Moscow State University of Civil Engineering. 2019. Pp. 1099–1101. (rus)

11. Mahmmod L.M.R., Dulaimi A., Bernardo L.F.A., Andrade J.M.d.A. Character-istics of Lightweight Concrete Fabricated with Different Types of Strengthened Lightweight Aggregates. Journal of Composites Science 2024. Vol. 8. 144. DOI: 10.3390/jcs8040144

12. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Y.Y., Sheichenko M.S. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of different genesis in building materials science [Mekhanoaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya

razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)

13. Steshenko A.B., Khudyakov A.I., Inozemtsev A.S., Inozemtsev S.S. Structural and thermal insulation foam concrete for individual monolithic housing construction [Konstrukcionno-teploizolyacionnyj penobeton dlya individual'nogo monolitnogo zhilishchnogo stroitel'stva]. Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. 2024. Vol. 16. No. 4. Pp. 320–328. DOI:10.15828/2075-8545-2024-16-4-320-328. (rus)

14. Netsvet D.D., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Composite binders with mineral additives for non-autoclaved foam concrete [Kompozicionnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami dlya neavtoklavnykh penobetonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 122–131. DOI:10.34031/article_5cb1e65d077f65.54773394. (rus)

15. Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.H., Nasonova V.V., Sumskoy D.A. Composite binder using aluminosilicate fillers and organic additives of biological origin [Kompozicionnoe vyazhushchee s ispol'zovaniem alyumosilikatnykh napolnitelej i organicheskikh dobavok biologicheskogo proiskhozhdeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 8–18. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-8-18. (rus)

16. Slavcheva G.S., Buimarova T.K. Physical and climatic resistance of foam concrete based on man-made raw materials [Fiziko-klimaticheskaya stojkost' penobetonov na osnove tekhnogennogo syr'ya]. FEPU: School of Engineering Bulletin. 2020. No. 2(43). Pp. 124–131. DOI:10.24866/2227-6858/2020-2-13 (rus)

17. Zhakanov A.N. Natural porous aggregates of light concrete [Prirodnye poristye zapolniteli legkogo betona]. Science and Technology of Kazakhstan. Pavlodar: Scientific Journal of Toraigyrov University. 2023. Pp. 155–162. DOI: 10.48081/LRRE9213 (rus)

18. Strotsky V.N., Savin V.I., Poletaev V.V. Strength characteristics of lightweight concrete on granular foam ceramic [Prochnostnye harakteristiki legkogo betona na granulirovannoj penosteklokeramike]. Beton i Zhelezobeton. 2023. No. 2(616). Pp. 14–30. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30. (rus)

19. Mestnikov A.E., Fedorov V.I. Mathematical planning in the design of lightweight concrete composition [Matematicheskoe planirovanie v proektirovanii sostava legkogo betona]. Modern high technologies. 2019. No. 11-1. Pp. 82–87. DOI: 10.17513/snt.37770. (rus)

20. Matveeva O., Baishev N., Makarov A., Popov A., Pavlyukova I., Grigoriev N. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application. Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 1. DOI:10.34910/MCE.125.7.

21. Popov A.L., Fedorov A.V. Binder for the production of lightweight concrete. Patent RF. № 2023105155, 2023

22. Popov A., Yadrikhinsky V., Mestnikov A. Peculiarities of hydration and frost resistance of cement with natural zeolite additive. Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 1(117). DOI: 10.34910/MCE.117.11.

23. Khudyakova L.I., Zalutsky A.V., Paleev P.L. The use of ash and slag waste from thermal power plants [Ispol'zovanie zoloshlakovyh othodov teplovyh elektrostancij]. Technosphere Safety. XXI Century. 2019. Vol. 4. No. 3(15). Pp. 375–391. DOI:10.21285/2500-1582-2019-3-375-391. (rus)

24. Davidyuk A.N. Structural and thermal insulation concretes on vitreous porous aggregates for effective enclosing structures [Konstrukcionno-teploizolyacionnye betony na steklovidnyh poristyh zapolnitelyah dlya effektivnyh ograzhdayushchih konstrukcij]. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2008. No. 4(12). Pp. 72–80. (rus)

25. Sapegin G.V., Semey N.S. Selection of the composition of structural and thermal insulation concrete based on granular foam glass using the apparatus of mathematical planning of the experiment [Podbor sostava konstrukcionno-teploizolyacionnogo betona na osnove granulirovannogo penostekla s primeneniem apparata matematicheskogo planirovaniya eksperimenta]. Engineering journal of Don. 2019. No. 4(55). (rus)

Information about the authors

Petrov, Aital A. Master student of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

Popov, Alexander L. PhD, Assistant Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. E-mail: surrukin@gmail.com. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

Fedorov, Artem V. Senior lecturer at the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: crawltrick@gmail.com. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

Received 28.10.2024

Для цитирования:

Петров А.А., Попов А.Л., Фёдоров А.В. Легкий бетон на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием природного цеолита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 17–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

For citation:

Petrov A.A., Popov A.L., Fedorov A.V. Lightweight concrete on a porous aggregate and a composite binder using natural zeolite. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 17–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39

Василькин А.А.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФРИКЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СРЫВЕ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация. В современной практике соотношение действующей нагрузки и сдвига стальных фрикционных соединений оценивается на основе коэффициента трения и предварительного натяжения болтов. Коэффициент трения определяется экспериментально путем испытания стандартных образцов. Обычно предполагается линейная зависимость действующей нагрузки и сдвига. Для разработки более точных моделей болтовых стальных соединений важно понимать поведение стандартных образцов на всех этапах нагружения. В статье представлены результаты проведения экспериментального исследования на натурных образцах фрикционных соединений стальных пластин на сжатие. Представлены и проанализированы результаты испытаний. Проанализирована работа фрикционных соединений после срыва контактных поверхностей. На основании анализа полученных результатов выявлена зависимость нагрузка – сдвиг на этапе фрикционной работы соединения и после срыва контактных поверхностей. Для проведения испытаний изготовлено 15 моделей фрикционных соединений с двусторонней накладкой с использованием болтов М18, класса прочности 10.9, болтов М20 класса 10.9, болтов М24 класса 12.9 Поверхность пластин обработана пескоструйной обработкой. Для определения усилия сдвига пакета использовалась разрывная машина Instron 1000HDX.

Ключевые слова: фрикционное соединение, соединение с контролируемым натяжением болтов, болтовое соединение, коэффициент трения.

Введение. Одним из способов соединения стальных элементов ответственных конструкций, в том числе работающих под воздействием динамической нагрузки, является фрикционные соединения, когда несущая способность соединения обеспечена за счет силы трения между поверхностями соединяемых элементов [1,2].

В представленной статье поставлена задача уточнения поведения фрикционного соединения после сдвига пластин.

В отечественной методике расчета по предельным состояниям наступление предельного состояния по первой группе возникает при превышении действующей нагрузки несущей способности болтового соединения. Последующие этапы работы стыка не учитываются в работе соединения. В тоже время в литературе имеется достаточно исследований работы соединения после сдвига пластин.

Улучшенное понимание поведения при сдвиге может быть использовано при проектировании соединений для модульных зданий, которые обеспечивают соответствующие допуски при монтаже на месте и контролируют возможное суммарное смещение при проскальзывании [3]. Также, данный этап работы учитывают в работе болтовых соединений с отверстиями большого размера, для допуска при выполнении монтажных работ в качестве разъёмных соединений крупногабаритных сборных элементов с возможностью повторного использова-

ния элементов [4], экспериментах по усталостному истиранию и износу контактных поверхностей [5], при работе болтов на циклическую нагрузку [6]. Исследователи отмечают, что состояние контакта следует разделить на три типа: полное скольжение без области сцепления, незначительное скольжение без стабильной области сцепления и локальное скольжение со стабильной областью сцепления [7].

Материалы и методы. В настоящем исследовании используются образцы, собранные на болтах М18, М20, М24, в продолжение исследования автора [8], где для соединения элементов были использованы болты М14.

Кроме того, в отличие от [8] нагружение образцов выполняется путем сжатия пакета пластин, поскольку данное нагружение позволяет уменьшить металлоемкость соединения и использовать один болтокомплект. Данный способ нагружения также достаточно часто используется при исследовании работы фрикционных соединений [9].

Для проведения испытания было подготовлено три группы образцов по пять стыков в каждой группе, которые отличались между собой диаметром и классом прочности используемого высокопрочного болта.

Были использованы болты

- диаметр М18, класс прочности 10.9 – 5 стыков;
- диаметр М20, класс прочности 10.9 – 5 стыков;

– диаметр М24, класс прочности 12.9 – 5 стыков.

Конструктивно стык состоит из трех пластин, соединенных одним высокопрочным болтом, так что одна из пластин выступает на величину равную толщине $\Delta = t_{пл}$, так, чтобы при приложении нагрузки не происходило потери устойчивости.

Гайки и шайбы использованы по ГОСТ 32484.1 – 2013. Болтокомплекты высокопрочные для предварительного натяжения конструкционные. Общие требования. Соединяемые пластины выполнены из горячекатаной стали марки Ст3сп-5 по ГОСТ 19903-2015 [10].

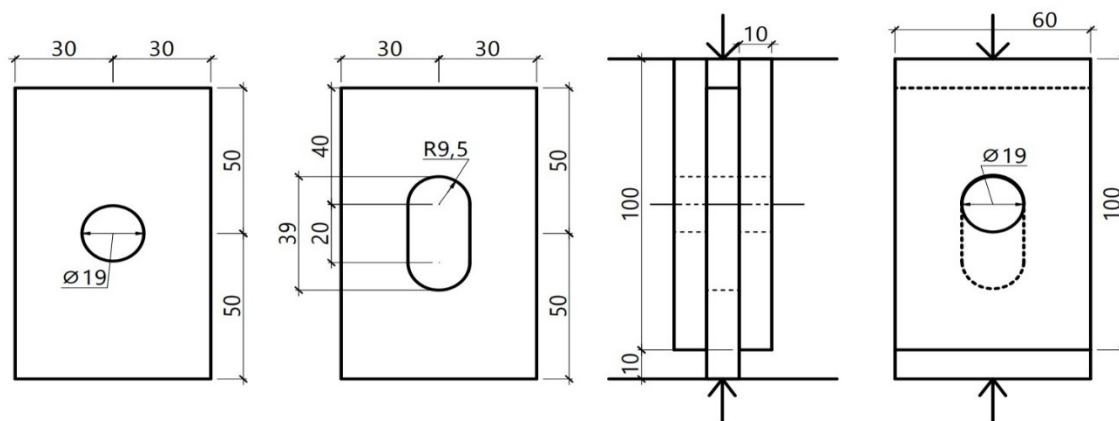


Рис. 1. Размеры образца

Данная конструкция модели позволит определить, как изменяется несущая способность соединения после сдвига пластин при превышении усилия Q_{bh} . то есть исследовать несущую способность соединения за счет силы трения скольжения.

При подготовке моделей применялась пескоструйная обработка контактных поверхностей с нормативным коэффициентом трения $\mu=0,58$ [2]. Для пескоструйной обработки использовался шлаковый песок типа «полуторка» фракции 0,5 – 1,5 мм и давление сжатого воздуха 8 атм. В соответствии с требованиями нормативных документов [11, 12, 13] перед обработкой контактных поверхностей с них удалены все дефекты и неровности, в том числе заусенцы вокруг отверстий, препятствующие плотному прилеганию элементов и деталей. Последующая сборка модели образцов осуществлялась в срок не превышающий трех суток.

Для натяжения болтов использован ключ динамометрический моментный шкальный КМШ-1400 с торцевыми головками соответствующего номера.

Для исследования работы соединения после сдвига необходимо обеспечить возможность перемещения элементов по контактным поверхностям не заставляя болт работать на срез. Для этого одна из пластин, которая будет перемещаться при нагружении, выполнена с овальным отверстием, так, чтобы при перемещении болт не упирался в торец отверстия и не стал работать на срез и смятие по принципу обычного болта, а продолжал перемещаться на 19-20 мм (рис.1).

Размеры элементов были рассчитаны минимально возможными исходя из допустимого расстояния от края пластины до центра болтового отверстия. Толщина пластин принята 10 мм, размеры в плане 60×100 мм.

Основная часть. Для создания нормативного усилия натяжения болта которое обеспечивает необходимую силу трения между соединяемыми поверхностями необходимо определить требуемый момент закручивания болтокомплекта.

Согласно ГОСТ Р 52643-2006 Болты и гайки высокопрочные для металлических конструкций, Приложение Е [14], крутящий момент определяют по формуле

$$M_{кр} = k \cdot P \cdot d \quad (1)$$

где k – коэффициент закручивания;

P – усилие натяжения, кН

d – диаметр болта, мм

Нормативные документы [11, 12] допускают принимать коэффициент закручивания $k = 0,17$ без предварительного испытания выборки из партии болтов.

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Для проведения испытаний модели были разделены на три группы: тип 1 – М18, тип 2 – М20, тип 3 – М24).

Для сравнения результатов натурного эксперимента предварительно определили теоретическую несущую способность соединения.

Таблица 1

Значения момента закручивания

Диаметр болта	Класс прочности болта	Усилие натяжения болта, кН	Коэффициент закручивания болта	Момент закручивания болта, Н·м
M18	10.9	140	0,17	428
M20	10.9	179	0,17	657
M24	12.9	318	0,17	1297

Согласно действующих норм СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Редакция 6 [2] расчетное усилие, которое может быть воспринято каждой плоскостью трения элементов, стянутых одним болтом с контролируемым натяжением, следует определять по формуле:

$$Q_{bh} = \frac{R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_h} \quad (2)$$

где R_{bt} - расчетное сопротивление растяжению болта, определяемое согласно требованиям п. 6.5 СП.

По нормам значение R_{bt} определяется как 0,7 от нормативного сопротивления стали болта по пределу текучести.

Для класса прочности 10,9: $R_{bun} = 1040$ МПа, $R_{bt} = 0,7R_{bun} = 1040 \cdot 0,7 = 728$ МПа

Для класса прочности 12,9: $R_{bun} = 1220$ МПа, $R_{bt} = 854$ МПа.

$\mu = 0,58$ – коэффициент трения для пескоструйной обработки;

$\gamma_h = 1,12$ – коэффициент контроля натяжения болта по моменту

Болт M18 площадь болта нетто $A_{bn} = 1,92$ см²

Болт M20 площадь болта нетто $A_{bn} = 2,45$ см²

Болт M24 площадь болта нетто $A_{bn} = 3,53$ см²

Максимальная несущая способность соединения

$$N_{max} = Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot n$$

$k=2$ – количество плоскостей трения

$n=1$ – количество болтов

$\gamma_c = 1$ – коэффициент условия работы соединения

$\gamma_b = 0,8$ – при количестве болтов $n < 5$

Итак, окончательно имеем несущую способность фрикционного соединения:

Соединение Тип 1, болт M18, класс прочности 10,9

$$Q_{bh} = \frac{R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \mu}{\gamma_h} = \frac{72,8 \cdot 1,92 \cdot 0,58}{1,12} = 72,3 \text{ кН}$$

$$N_{max} = Q_{bh} \cdot k \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c \cdot n = 72,3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 116 \text{ кН}$$

Тип 2. болт M20; класс прочности 10,9

$$Q_{bh} = \frac{72,8 \cdot 2,45 \cdot 0,58}{1,12} = 92,3 \text{ кН}$$

$$N_{max} = 92,3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 147,8 \text{ кН}$$

Тип 3. болт M24; класс прочности 12,9

$$Q_{bh} = \frac{85,4 \cdot 3,53 \cdot 0,58}{1,12} = 156 \text{ кН}$$

$$N_{max} = 156 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 249,6 \text{ кН}$$

Испытания проводились в лаборатории испытаний строительных материалов, изделий и конструкций НИУ МГСУ.

Образцы испытаны на сжатие в разрывной машине Instron 1000HDX (рис. 2).

По результатам проведения испытаний были построены графики работы стыков пластин. Характерная форма графика представлена на рис. 3.

На графике (рис. 3) можно выделить следующие этапы работы соединения.

На участке А-Б происходит упругая деформация пластин от приложенной нагрузки, затем от точки Б до точки 1 появляются пластические деформации; точка 1 – максимальная несущая способность соединения за счет силы трения соединяемых поверхностей, после преодоления которой несущая способность снижается и после перемещения поверхностей трения на 0,2d остается практически без изменений.

Несущую способность соединения в точке 1, то есть момент исчерпания несущей способности соединения Q_{bh} предложено обозначать как срыв контактных поверхностей [15], что весьма точно отражает физический смысл работы стыка.

Результаты проведенных испытаний стыков представлены в таблице 2.

Как следует из представленных данных, все испытанные модели не достигли расчетного значения усилия сдвига, так что фактическая несущая способность соединения составила 0,35–0,45 Q_{bh} .



Рис. 2. Испытание образцов на сжатие на разрывной машине Instron 1000HDX

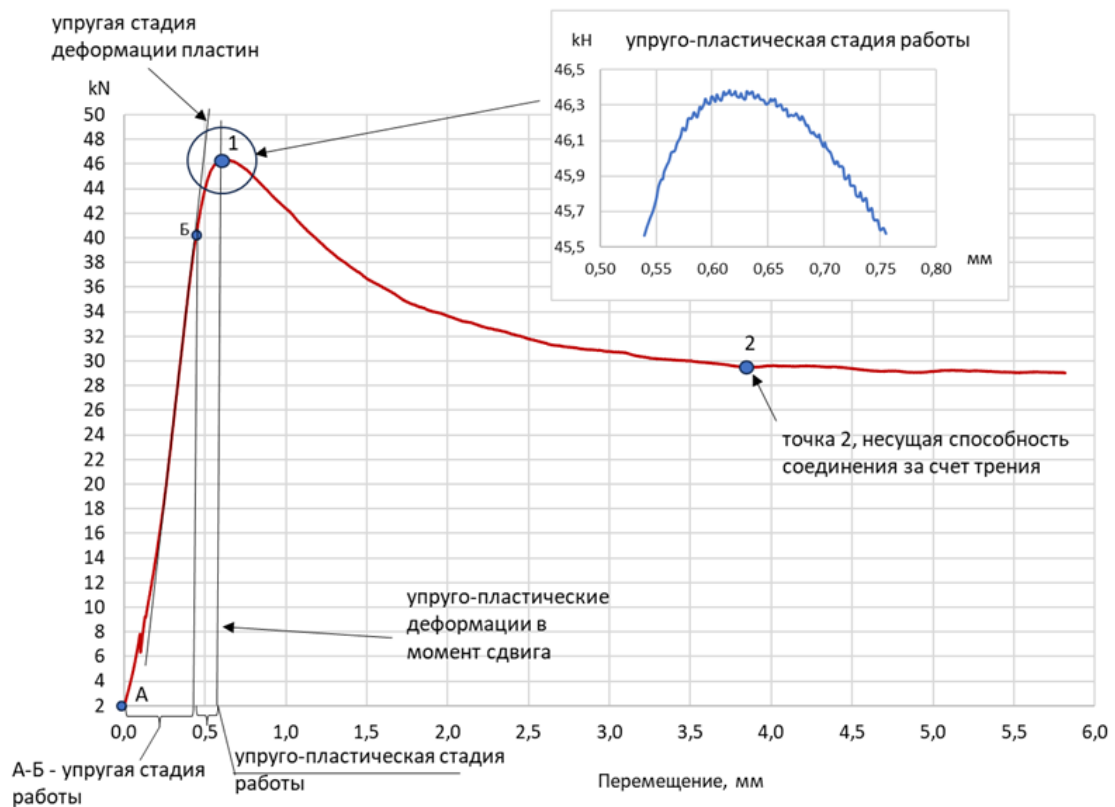


Рис. 3. Характерная диаграмма работы соединения

В отличие от исследования коллег [15] процесс срыва контактных поверхностей испытуемых стыков не сопровождался щелчками. Все 15 образцов после превышения усилия сдвига

плавно перемещались, что также отражают графики несущей способности, на которых изменение несущей способности происходит без резких перегибов.

Таблица 2

Несущая способность образцов тип 1 (M18, 10.9), тип 2 (M20, 10.9), тип 3 (M24, 12.9)

Образец	Экспериментальное усилие сдвига, кН	Расчетная несущая способность соединения, кН	% от расчетной несущей способности	Значение перемещения, при котором произошел сдвиг, мм
1-2	82,1	116	70,78	1,66
1-3	83,6	116	72,07	0,93
1-4	53,0	116	45,69	2,42
1-5	65,0	116	56,03	2,76
2-1	53,7	147,8	36,4	0,76
2-2	68,4	147,8	46,3	1,66
2-3	59,7	147,8	40,4	0,97
2-4	50,9	147,8	34,4	0,79
2-5	66,1	147,8	44,7	0,81
3-2	184,5	249,6	73,92	2,78
3-3	152,8	249,6	61,22	2
3-4	185,5	249,6	74,32	2,89
3-5	204,9	249,6	82,09	3,5

В исследовании сдвиг происходит при 0,76 – 0,97 мм. За рубежом предложено считать начало сдвиг пластин при перемещении 0,15 мм [16].

После срыва контактных поверхностей несущая способность образцов не уменьшается до

нуля, поскольку перемещению препятствует коэффициент трения скольжения пластин. Полученные значения представлены в таблице 3 (точка 2 на графике 3).

Таблица 3

Несущая способность моделей после срыва контактных поверхностей

Образец	Максимальное усилие сдвига, кН	Несущая способность соединения, N _{min} , кН	Снижение несущей способности, %	Перемещение соответствующее N _{min} , мм
1-2	82,1	44,4	37,7	
1-3	83,6	51,7	31,9	
1-4	53,0	–	–	
1-5	65,0	46	19	
2-1	53,7	37,4	30,4	3,5–0,76 = 2,74
2-2	68,4	65,5	4,2	2,3–1,66 = 0,34
2-3	59,7	28,9	51,6	5,5–0,97 = 4,53
2-4	50,9	–	–	–
2-5	66,1	56,4	14,7	2,5–0,81 = 1,19

Из представленных результатов следует, что несущая способность за счет трения скольжения составляет $N_{\min} = 0,48–0,85$ несущей способности соединения $N_{\max}$.

Разброс несущей способности соединения для одинаковых болтов можно объяснить различным усилием натяжения болтов. По исследованиям зарубежных авторов распределение усилия натяжения болта имеет гауссовское распределение и может различаться до 30 % для одного момента затяжки [17].

В трех испытанных образцах несущая способность при перемещении пластин после точки 2 постепенно возрастает. Однако растет она

весьма полого и не дает никакого практического значения, поскольку при перемещениях даже в 7–8 мм несущая способность соединения за счет силы трения скольжения не превышает несущую способность соединения до сдвига. Как известно, фактическая разность в диаметрах отверстия и болта для высокопрочных болтов составляет 2–3 мм, то есть в момент, когда болт выберет зазор и упрется в пластину, несущая способность соединения будет существенно снижена.

График изменения несущей способности образцов **Тип 1** (M18, 10.9) представлена на рис. 4.

Несущая способность образцов **Тип 3** (M24, 12.9) представлена на рис. 5.

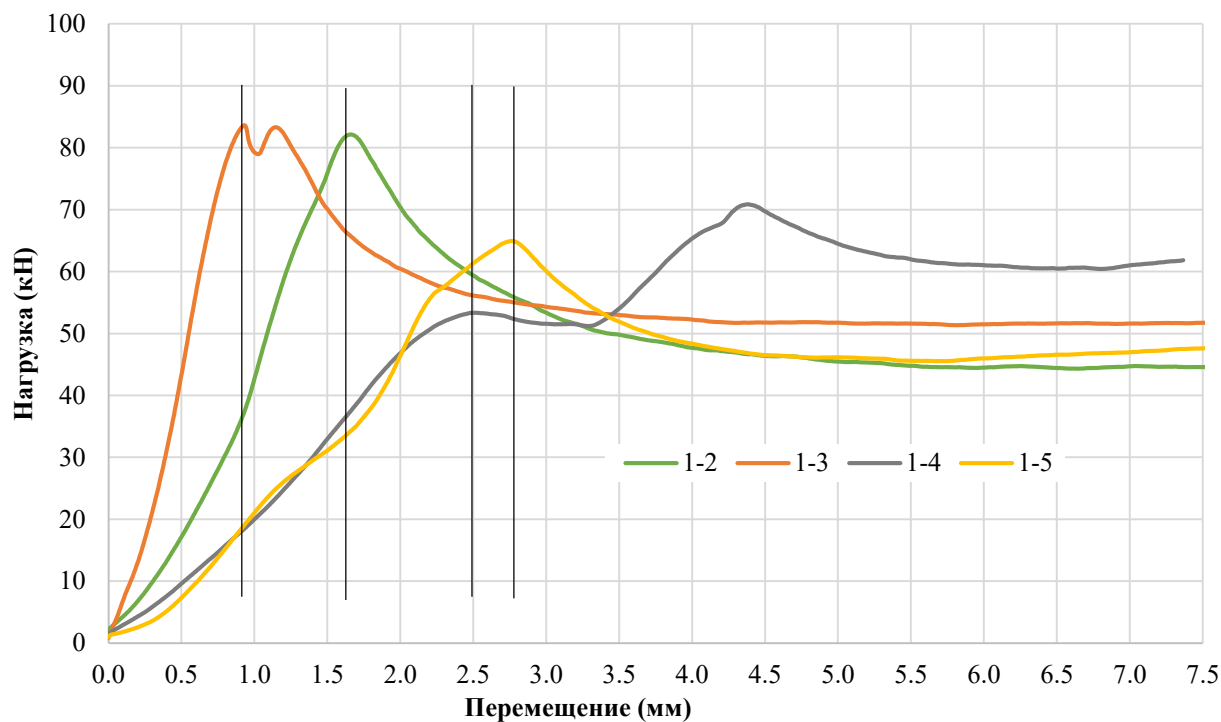


Рис. 4. Диаграмма работы образцов Типа 1

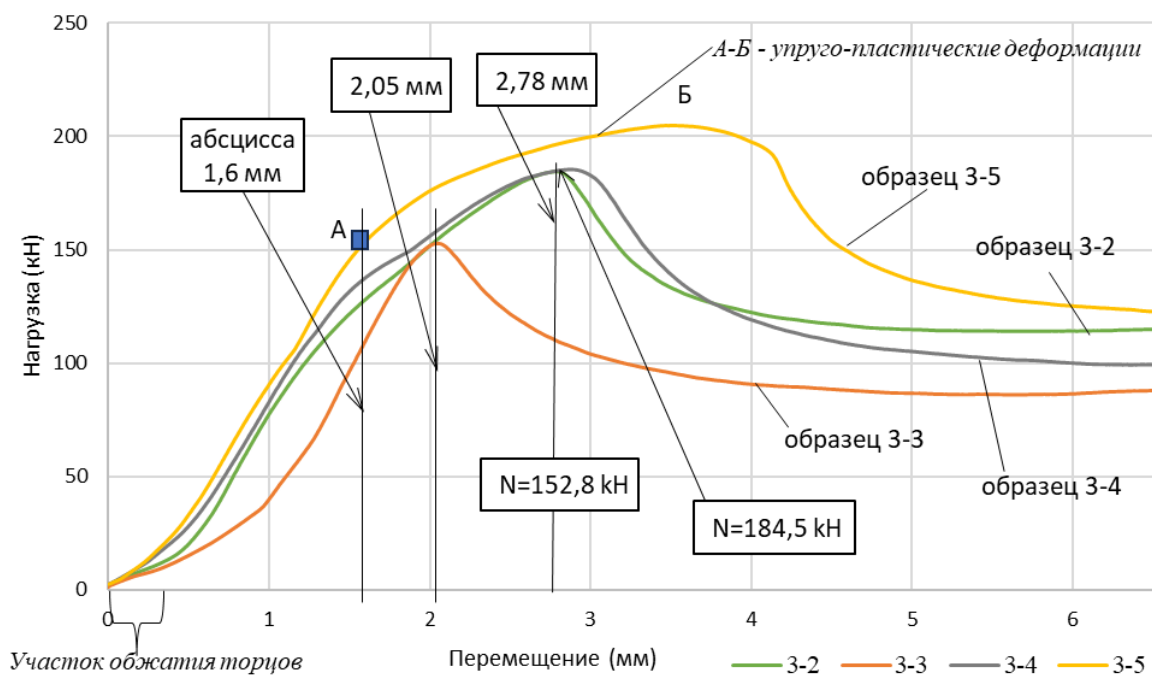


Рис. 5. Диаграмма работы образцы Типа 3

Разброс по несущей способности по образцам типа 3 лежит в пределах 10 %, за вычетом одного отбраковочного значения (образец 3-3).

Начальный участок на всех графиках выглядит как упруго-пластические деформации и видимо объясняется обжатием образцов из-за неточностей изготовления и сборки – непараллельность торцов пластин. Затем, на втором этапе работы – до ординаты 1,6 мм возникают упругие

деформации. Для образца 3-5 в точке А, а для образцов 3-2, 3-4 происходит изменение угла наклона кривой и очевидно переход к упруго-пластической работе образца. Данный вывод подкрепляется расчетом, откуда следует, что напряжения в элементах 3-2, 3-4, 3-5 превысили расчетное сопротивление стали и сталь начала пластически деформироваться.

Также видно, что образец 3-3 сначала имеет длинный участок предварительного обжатия (обжатия) – почти в 1 мм и затем, практически до абсциссы 2,05 мм работает упруго, то есть добавляется к перемещениям еще 1 мм и затем график достаточно резко (по сравнению с остальными образцами) идет вниз, то есть экстремум графика есть несущая способность фрикционного соеди-

$$\text{Образец 3-2. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{184,5}{6,2 \cdot 1} = 29,8 \text{ кН/см}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ кН/см}^2$$

$$\text{Образец 3-3. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{152,8}{6,2 \cdot 1} = 24,6 \text{ кН/см}^2 \approx R_y \gamma_c = 24,5 \text{ кН/см}^2$$

$$\text{Образец 3-4. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{184,5}{6,2 \cdot 1} = 29,8 \text{ кН/см}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ кН/см}^2$$

$$\text{Образец 3-5. } \sigma = \frac{N}{A} = \frac{204,5}{6,2 \cdot 1} = 33 \text{ кН/см}^2 > R_y \gamma_c = 24,5 \text{ кН/см}^2$$

Нагрузка, при которой пластина переходит в упруго-пластическую стадию работы

$$N = R_y \gamma_c \cdot A = 24,5 \cdot 6,2 = 152 \text{ кН}$$

Поскольку средняя пластины выступает на 7–10 мм и ее толщина также составляет 10 мм принимаем, что пластина работает на сжатие без потери устойчивости, поэтому коэффициент продольного изгиба не учитывается.

Наиболее ярко упруго-пластическая работа пластин в образцах видна в образце 3-5, где на участке между точками А и Б сталь образца работает упруго-пластически. Анализируя графики на рис 5 можно сказать, что выбранные размеры пластин в исследуемом стыке позволили экспериментально и графически подтвердить теоретические представления о работе образцов за пределами несущей способности по пределу текучести, когда несущая способность соединения за счет контролируемого натяжения болта превышает несущую способность самих стальных элементов.

В результате эксперимента фактическая несущая способность соединения оказалась значительно ниже расчетной несущей способности – 0,60–0,80 Q_{bh} . При увеличении усилия натяжения болта несущая способность соединения становится наиболее близкой к теоретической.

Отличие теоретической и фактической несущей способности испытанных образцов можно объяснить использованием болтов с обычной головкой. В работе И.И.Ведякова, Д.В. Кониной, П.В. Нахвальнова [15] обращается внимание на необходимость использования метизов с увеличенными размерами болтов и гаек и более низкие значения несущей способности соединений с обычными размерами головки.

Выводы. В соответствии с вышеуказанными методами и теорией работы фрикционных соединений была определена работа соединения

после срыва контактов поверхностей. Описано изменение несущей способности соединения для болтов с различным усилием натяжения с использованием высокоточного оборудования.

Расчетные напряжения в пластинах составили

после срыва контактов поверхностей. Описано изменение несущей способности соединения для болтов с различным усилием натяжения с использованием высокоточного оборудования.

Основные выводы заключаются в следующем.

Установлено, что фактическая несущая способность соединения для всех образцов существенно ниже теоретической несущей способности, Q_{bh} . вычисленное по СП 16.13330.2017. Стальные конструкции и составляет для Тип 1 – 0,56–0,72 Q_{bh} ; Тип 2 – 0,35–0,45 Q_{bh} ; Тип 3 – 0,61–0,82 Q_{bh} .

Наблюдается значительный разброс несущей способности соединения (для болтокомплектов с одинаковым диаметром и классом прочности). Разброс несущей способности по образцам тип 1 в пределах 23 % с отбросом одного явно минимального значения; по образцам тип 2 в пределах 20 % и по образцам типа 3 лежит в пределах 10 %, также за вычетом одного отбраковочного значения.

После преодоления статического коэффициента трения и сдвига пластин в пределах овального отверстия несущая способность фрикционного соединения снижается в пределах: для Тип 1: $N_{\min} = 0,65–0,8 N_{\max}$; Тип 2: $N_{\min} = 0,48–0,85 N_{\max}$; Тип 3 – 0,61–0,82 $N_{\max}$, после чего несущая способность преимущественно снижается или остается неизменной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование металлических конструкций. Часть 1: «Металлические конструкции. Материалы и основы проектирования». Учебник для ВУЗов / Тихонов С., Алехин В., Беляева З. и др. под общей. ред. Туснина А.. М.: Издательство «Перо», 2020. 468 с.

2. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Редакция 6.
3. Lacey W., Chen W., Hao H., Bi K. Experimental and numerical study of the slip factor for G350-steel bolted connections // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 576-590. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.04.012
4. Christoforidou A., Baskar A., Bareltis E., Kavoura F., Pavlovic M. Fatigue performance of preloaded bolted connection with oversized holes. 2023. 6(3-4). DOI:10.1002/cepa.2447.
5. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear // ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. 032066. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032066.
6. Sabbagh A. B., Petkovski M., Pilakoutas K., Mirghaderi R. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 100–108.
7. Izumi S., Sakai S. Analytical modeling of the transverse load-displacement relation of a bolted joint with consideration of the mechanical behavior on contact surfaces. 2009. DOI:10.1115/PVP2009-77612.
8. Василькин А.А., Зубков Г.В., Прокаев С.А., Василькин И.А. Размер площадки трения фрикционного болтового соединения // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. С. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4
9. Соловьев Д.В., Конин Д.В., Коваленко А.И., Нахвальнов П.В. Исследование работы соединений на высокопрочных болтах // Сборник тезисов докладов. Международный строительный конгресс. 2023. С. 202–205
10. ГОСТ 32484.1-2013. Болтокомплекты высокопрочные для предварительного натяжения конструкционные. Общие требования. 2014.
11. СТП 006-97. Устройство соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов. Трансстрой. М. 1998.
12. СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012. Болтовые соединения. Правила и контроль монтажа, требования к результатам работ. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 2013, 57 с.
13. ГОСТ Р 70132-2022. Сборка болтовых соединений строительных металлических конструкций. Правила и контроль выполнения работ. 2022.
14. ГОСТ Р 52643-2006. Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций. Общие технические условия. 2007.
15. Ведяков И.И., Конин Д.В., Нахвальнов П.В. Экспериментальное исследование фрикционных болтовых соединений из высокопрочных сталей // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 7. С. 24–33.
16. Poposka M., Petreski B., Cvetanovski P., Popovski D. Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts. 2014. 8. Pp. 37–43.
17. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear // ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.612. 032066. DOI:10.1088/1757-899X/612/3/032066.

Информация об авторах

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

Поступила 03.10..2024 г.

© Василькин А.А. 2025

Vasilkin A.A.

National Research University Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)

E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SLIP FACTOR STEEL BOLTED CONNECTIONS

Abstract. In modern practice, the ratio of the effective load and shear of steel friction joints is estimated based on the coefficient of friction and pre-tension of bolts. The coefficient of friction is determined experimentally by testing standard samples. A linear dependence of the effective load and shear is usually assumed. In order to develop more accurate models of bolted steel joints, it is important to understand the behavior of standard samples at the initial stage of loading. An experimental study was carried out on full-scale samples of friction joints of steel plates for compression. The test results are presented and analyzed. The work of friction joints after the breakdown of the contact surfaces is analyzed. Based on the analysis of the results obtained, the load –shift dependence was revealed at the stage of friction operation of the joint and after the

breakdown of the contact surfaces. For testing, 15 full-scale joints of friction joints with a double-sided lining were made using M18 bolts, strength class 10.9, M20 bolts of class 10.9, M24 bolts of class 12.9, the surface of the plates was sandblasted. The Instron 1000HDX breaking machine was used to determine the shear force of the package.

Keywords: *coefficient of static friction, steel high-strength bolted connection; faying surface slip.*

REFERENCES

1. Design of metal structures. Part 1: Metal structures. Materials and fundamentals of design. Textbook for universities [Proektirovanie metallicheskikh konstrukcij. Chast' 1: «Metallicheskie konstrukcii. Materialy i osnovy proektirovaniya». Uchebnik dlya VUZov] Tihonov S., Alekhin V., Belyaeva Z. i dr. pod obshchej. red. Tushina A. Moscow. Pero. 2020, 468 p. (rus)
2. SP 16.13330.2017. A set of standards. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81*. Edition 6. [SP 16.13330.2017. Svod pravil. Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNiP II-23-81*. Redakciya 6.] (rus)
3. Lacey W., Chen W., Hao H., Bi K. Experimental and numerical study of the slip factor for G350-steel bolted connections. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 576-590. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.04.012
4. Christoforidou A, Baskar A., Bareltis E., Kavoura F., Pavlovic M. Fatigue performance of preloaded bolted connection with oversized holes. 2023. 6(3-4). DOI: 10.1002/cepa.2447.
5. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear. ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. 032066. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032066.
6. Sabbagh A. B., Petkovski M., Pilakoutas K., Mirghaderi R. Cyclic behaviour of bolted cold-formed steel moment connections: FE modelling including slip. Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 100–108.
7. Izumi S, Sakai S. Analytical modeling of the transverse load-displacement relation of a bolted joint with consideration of the mechanical behavior on contact surfaces. 2009. DOI: 10.1115/PVP2009-77612.
8. Vasil'kin A., Zubkov G., Prokaev S., Vasil'kin I. The size of the friction pad of the friction bolt connection [Razmer ploshchadki treniya frikcionnogo boltovogo soedineniya]. Construction: science and education. 2024. Vol. 14. No. 1. Pp. 61–72. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.4 (rus)
9. Solov'ev D.V., Konin D.V., Kovalenko A.I., Nahval'nov P.V. Investigation of the work of joints on high-strength bolts. [Issledovanie raboty soedinenij na vysokoprochnyh boltah]. Collection of abstracts. International Construction Congress. 2023. Pp. 202–205. (rus)
10. GOST 32484.1-2013. Bolt sets are high-strength structural for prestressing. General requirements [Boltokomplekty vysokoprochnye dlya predvaritel'nogo natyazheniya konstrukcionnye. Obshchie trebovaniya.] 2014. (rus)
11. STP 006-97. The device of connections on high-strength bolts in steel structures of bridges. Transstroy [Ustrojstvo soedinenij na vysokoprochnyh boltah v stal'nyh konstrukciyah mostov]. Transstroj. Moscow. 1998. (rus)
12. STO NOSTROJ 2.10.76-2012. Bolted connections. Rules and control of installation, requirements for the results of work [Boltovye soedineniya. Pravila i kontrol' montazha, trebovaniya k rezul'tatam rabot]. Moscow. CNIIPSK im. Mel'nikova. 2013. 57 p. (rus)
13. GOST P 70132-2022. Assembly of bolted joints of building metal structures. Rules and control of work performance [Sborka boltovyh soedinenij stroitel'nyh metallicheskikh konstrukcij. Pravila i kontrol' vypolneniya rabot]. 2022. (rus)
14. GOST P 52643-2006. Bolts and nuts vysokoprochnye and shajby dlya metallicheskikh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Bolty i gajki vysokoprochnye i shajby dlya metallicheskikh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya]. 2007. (rus)
15. Vedyakov I., Konin D., Nahval'nov P. Experimental study of friction bolted joints made of high-strength steels [Eksperimental'noe issledovanie frikcionnyh boltovyh soedinenij iz vysokoprochnyh stalej]. 2022. Vol.7. Pp. 24-33. (rus)
16. Poposka M., Petreski B., Cvetanovski P., Popovski D. Experimental procedure for slip factor determining at connections with preloaded bolts. 2014. 8. Pp. 37–43.
17. Jiao X., Cai L., Liu Z., Yang C., Zhao Y., Cheng Q. Effect of bolt relaxation on surface micro dynamic fatigue and wear. ACMME 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol.612. 032066. doi:10.1088/1757-899X/612/3/032066.

Information about the authors

Vasilkin Andrey A. PhD. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. National Research "Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26.

Received 03.10.2024

Для цитирования:

Василькин А.А. Экспериментальное исследование работы фрикционного соединения при срыве контактных поверхностей// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39

For citation:

Vasilkin A.A. Experimental study of the slip factor steel bolted connections. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 30–39. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-30-39

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-40-48

^{1,*}Серых И.Р., ¹Чернышева Е.В., ²Серых В.Д.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: inna_ad@mail.ru

ЭКСПЕРТИЗА ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

Аннотация. Дымовые трубы являются неотъемлемой конструктивной частью котельной, поскольку предназначены для отвода и рассеивания продуктов сгорания топлива. Сбой в их работе приведет к нарушению бесперебойного снабжения потребителей теплом и электричеством. С увеличением срока эксплуатации конструкции растет вероятность появления в ней каких-либо дефектов или повреждений. Поэтому с течением времени встает вопрос об обеспечении безопасности использования таких сооружений. Для обеспечения бесперебойной и длительной работы дымовых труб необходимо периодически контролировать их техническое состояние: проводить плановые обследования, в обязательном порядке устраняя выявленные неисправности.

Обследование проводилось с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации промышленной дымовой трубы. Во время проведения экспертизы устанавливались дефекты и повреждения, которые потенциально могли повлиять на безопасную эксплуатацию объекта; выявлялись причины их возникновения. Для оценки технического состояния дымовой трубы был выполнен анализ конструктивного решения, условий эксплуатации элементов конструкции, а также качества конструкций, материалов и соединений.

В результате визуального и измерительного контроля выявлены дефекты и повреждения, имеющие нарушения требований эксплуатации и приводящие к нарушению работоспособности конструкции. Результаты, изложенные в статье, могут быть интересны специалистам экспертных организаций, которые занимаются экспертизой промышленных дымовых труб с целью оценки фактического состояния их конструктивных элементов.

Ключевые слова: дымовые трубы, дефекты и повреждения, экспертиза промышленной безопасности.

Введение. Дымовые трубы являются неотъемлемой конструктивной частью котельной, поскольку предназначены для отвода и рассеивания продуктов сгорания топлива. Сбой в их работе приведет к нарушению бесперебойного снабжения потребителей теплом и электричеством. Благодаря создаваемой естественной тяге в следствие разницы температур, эксплуатация дымоотводов становится безопасной [1–4]. От их исправного состояния напрямую зависит экологическая безопасность промышленного предприятия [5–7].

При работе дымовой трубы реализуется принцип сообщающихся сосудов: в силу того, что вес горячего воздуха меньше холодного, поступающий из атмосферы воздух проникает в топку, а из дымоотвода удаляется уже отработанный. В процессе эксплуатации такие конструкции испытывают атмосферные воздействия (ветровые нагрузки, осадки, перепад температур), вынуждены выдерживать влияние агрессивной среды, их внутренняя поверхность ежедневно подвергается абразивному износу.

Конструкция и материал дымовых труб может быть различный. Но в большинстве случаев – это классическая металлическая, кирпичная или железобетонная труба, высота которой зависит от материала: металлические, как

правило, не превышают 40 м, кирпичные – 70 м, железобетонные – 300 м. Однако, есть исключения [8]. Например, титул самой высокой в мире трубы по праву принадлежит Экибастузской тепловой электростанции в Казахстане и составляет 420 м, на втором месте дымовая труба плавильной печи в Канаде – 380 м, на третьем – дымовая труба электростанции в штате Пенсильвания в США высотой 371 м. В России тоже есть свои рекордсмены. Например, дымовая труба Березовской электростанции в Красноярском крае имеет высоту 370 м, а высота дымоотвода Рефтинской ГРЭС в Свердловской области составляет 330 м.

В настоящее время большая часть эксплуатируемых дымовых труб была построена еще в середине или второй половине прошлого века. Их срок службы либо уже истек, либо подходит к концу. Например, срок службы железобетонных дымоотводов достигает 50 лет, металлических – всего 20-30. Исключение составляют кирпичные дымовые трубы, которые при должном уходе могут служить до 70-100 лет. Следует отметить, что обследование железобетонных труб после сорока лет эксплуатации показывает, что прочность бетонного оголовка ствола снижается на 50% [9]. Это является следствием того, что данная часть конструкции больше других подвержена агрессивному воздействию среды как с внешней, так и

внутренней стороны. Подобному процессу разрушения подвержены и кирпичные дымовые трубы. Потеря несущей способности в металлических дымоотводах происходит в большей степени в результате коррозии материала трубы.

Понятно, что с увеличением срока эксплуатации конструкции растет вероятность появления в ней каких-либо дефектов или повреждений [10]. Поэтому с течением времени встает вопрос об обеспечении безопасности использования таких сооружений. Для обеспечения бесперебойной и длительной работы дымовых труб необходимо периодически контролировать их техническое состояние: проводить плановые обследования, в обязательном порядке устраняя выявленные неисправности [11].

Каждый год более ста дымовых труб промышленных предприятий подвергаются ремонту, в процессе которого полностью или фрагментарно заменяются элементы, более других подверженные коррозионному износу (оголовки труб, теплоизоляция труб, кирпичная футеровка и т.д.); выполняются работы по восстановлению защитного слоя бетона наружной поверхности ствола; усиление металлическими обоймами ослабленных в процессе эксплуатации частей железобетонной конструкции [9].

Несвоевременное устранение дефектов и повреждений дымовых труб может привести к их обрушению, что несомненно приведет к остановке производственного процесса и, как следствие, к немалым экономическим потерям. К числу таких аварий можно отнести разрушение в 1991 году верхней части ствола дымовой трубы высотой сто пятьдесят метров, расположенной на территории Уфимского нефтеперерабатывающего завода; частичное обрушение в 2022 году дымовой трубы ТЭЦ высотой сто пятьдесят метров в Петропавловске; обрушение в 2023 году дымовой трубы высотой сто двадцать метров уральского завода в Краснотурьинске; частичное обрушение в 2021 году дымовой трубы ТЭЦ высотой сто двадцать метров в Барнауле [12].

В настоящее время на балансе промышленных предприятий нашей страны находится большое количество дымовых труб. Более ста тысяч из них выполнены из керамического кирпича и эксплуатируются на территории котельных. Высота подобных труб обычно варьируется в пределах 30–40 метров. Выбор строительного материала здесь не случаен. В середине прошлого века красный глиняный кирпич был достаточно доступным и сравнительно недорогим материалом по сравнению с металлом. Построенные в эти годы котельные чаще всего работали на жидком и твердом топливе. Выполненные из кирпича ды-

мовые трубы, демонстрировали высокую надежность, обусловленную, главным образом, высокой температурой уходящих газов, которая составляла 180–250 °С. С течением времени произошел переход данных объектов энергетической промышленности на природный газ, что было мотивировано стремлением руководства повысить их экономическую эффективность. Данное стремление реализовалось путем снижения температуры дымовых газов. Это неизбежно приводило к разрушению внутренней поверхности ствола трубы.

В данной статье рассмотрена экспертиза промышленной безопасности дымовой трубы, установленной на территории котельной в Московской области.

Обследование проводилось с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации промышленной дымовой трубы. Во время проведения экспертизы устанавливались дефекты и повреждения, которые потенциально могли повлиять на безопасную эксплуатацию объекта; выявлялись причины их возникновения.

Методика проведения обследования. Обследование дымовых труб котельных выполняют в первую очередь с целью оценки технического состояния ее конструктивных элементов. С учетом обнаруженных дефектов и повреждений определяется их надежность, разрабатываются рекомендации, в которых предлагаются мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации и прогнозируется ее продолжительность. Согласно [13], обследование промышленных дымовых труб производится с помощью специализированного оборудования и приборов. При этом рекомендуется придерживаться определенного объема работ:

1. проанализировать предоставленную техническую и исполнительную документацию на объект обследования;
2. определить фактические условия эксплуатации конструкции дымовой трубы (режим ее эксплуатации, анализ химического состава дымовых газов, вид и объем сжигаемого топлива);
3. произвести наружный осмотр промышленной дымовой трубы, в ходе которого выявляют наличие выпучивания кирпичной кладки на участках между стяжными кольцами, деформаций в оголовке трубы, разрушений элементов кладки, вертикальных и горизонтальных трещин; обращают внимание на состояние стяжных колец, места выхода наружу конденсата; проверяют целостность болтовых соединений; устанавливают степень повреждения ходовых лестниц и другие дефекты;
4. провести внутренний осмотр футеровки дымовой трубы, в ходе которого при полной

остановке котельного оборудования обращают внимание на наличие следующих дефектов и повреждений:

- состояние кирпичной кладки: разрушения, выпучивания, наличие трещин (вертикальных и горизонтальных), сквозных отверстий или щелей;
 - химическое воздействие: наличие коррозии и степень ее проникновения в тело кладки и др.;
5. с помощью неразрушающих методов контроля провести определение прочности и состояния материала дымовой трубы;
 6. определить крен дымовой трубы;
 7. установить причины дефектов и повреждений;
 8. оформить экспертное заключение с рекомендациями по устранению выявленных дефектов и повреждений.

Основная часть. Дымовая кирпичная труба высотой 30 метров с диаметром устья 1,6 метра служит для отвода и рассеивания дымовых газов. Она спроектирована таким образом, чтобы обеспечить безопасное рассеивание газов различной температуры, влажности и химического состава, не превышая допустимые санитарные нормы концентрации вредных веществ на уровне земли. Дымовые газы отводятся от трех водогрейных котлов, работающих на природном газе.

Дымовая труба расположена рядом со зданием котельной и имеет отдельный фундамент, который запроектирован железобетонным, из жаростойкого бетона марки М200, на портландцементе с шамотным заполнением и тонкомолотой добавкой. Он имеет круглую в плане форму диаметром 4,5 м и представляет собой стакан высотой 3,85 м, опертый на круглую плиту диаметром 6,0 м с глубиной заложения подошвы 3,5 м.

Самонесущий газоотводящий ствол выполнен из обычного глиняного кирпича марки 100 на известковом растворе и имеет форму усеченного конуса с уклоном наружной поверхности ствола к вертикали по всей высоте. Ствол укреплен стальными стяжными кольцами. Толщина стенок изменяется от 680 мм внизу до 380 мм вверху. Материал футеровки ствола трубы – кислотоупорный кирпич, раствор также кислотоупорный. Между стволом и футеровкой устроена воздушная прослойка толщиной 50 мм, которая несет на себе функции теплоизоляционного слоя. На оголовке трубы расположены два молниеприемника с одним токоотводящим канатом. Газоходы выполнены из глиняного кирпича, толщина стенок 250 мм. Их примыкание осуществляется через один проем на отметке 2,7 м. Светофорных площадок на стволе трубы не предусмотрено.

Общий вид и схема элементов дымовой трубы показаны на рис. 1.

Результаты обследования дымовой трубы показали следующее:

- анализ проектной, ремонтной и эксплуатационной документации показал отсутствие ее отдельных частей;
- анализ условий эксплуатации дымовой трубы показал их полное соответствие требованиям нормативной документации;
- визуально-инструментальный осмотр наружной поверхности трубы показал наличие ряда дефектов и повреждений, которые относятся к категории опасности «Б» [13] (рис. 2), а именно: деформация замка стяжного кольца на отметке 0,4 м; коррозия всех стяжных колец и их ослабление; по стволу дымовой трубы в районе ходовых скоб идут вертикальные трещины с шириной раскрытия более 10 мм; в швах кирпичной кладки ствола на отметках 23,0–26,0 м выявлены четыре сквозных отверстия; на отметке 27,0 м обнаружена горизонтальная трещина шириной раскрытия до 30 мм и длиной 0,5 м; в оголовке трубы зафиксирована эрозия раствора кирпичной кладки глубиной до 30 мм; выявлены следы конденсата на наружной поверхности трубы вдоль стыков; на отметке 28,5 м разрушены цементные отливы карниза и оголовка трубы;
- визуально-инструментальный осмотр внутренней поверхности трубы показал наличие ряда дефектов и повреждений, которые также относятся к категории опасности «Б» [13] (рис. 3), а именно: на отметке –2,7 м в зольнике трубы выявлены отложения твердых фракций дымовых газов с толщиной отложений 30 см; подобные отложения выявлена на отливах звеньев футеровки толщиной 10 мм и 20 мм; днище трубы залито водой, глубиной 20 см; на отметках –0,3–1,3 м проходит наклонная трещина шириной раскрытия 20 мм; на отметке 7,1 м выявлено выпучивание верхних рядов футеровочного звена внутри трубы на 30 мм; на отметках 13,2 м, 22,3 м, 29,0 м образовались вертикальные трещины длиной до полуметра с шириной раскрытия до 30 мм; обнаружено обрушение отдельных кирпичных перекрытий газоходов и разрушение его стен до 20% от толщины кирпича; выявлены сквозные отверстия в футеровке, вероятно оставленные при ее кладке; на отметке 27,8 м ряд кирпичей в кладке ствола уложен не качественно – вертикально на ребра;
- по результатам геодезических измерений, наибольшее значение крена дымовой трубы составило 174 мм в юго-восточном направлении, что не превышает значение (210 мм), установленное интерполяцией согласно [14];

– по результатам определения прочности материалов дымовой трубы ее среднее фактическое значение на контрольных участках (рис. 1) получилось в пределах средней прочности кирпича марки М100 и бетона марки 250; среднее

фактическое значение прочности кирпичной кладки газоходов ствола дымовой трубы ниже средней прочности для кирпича марки М100;

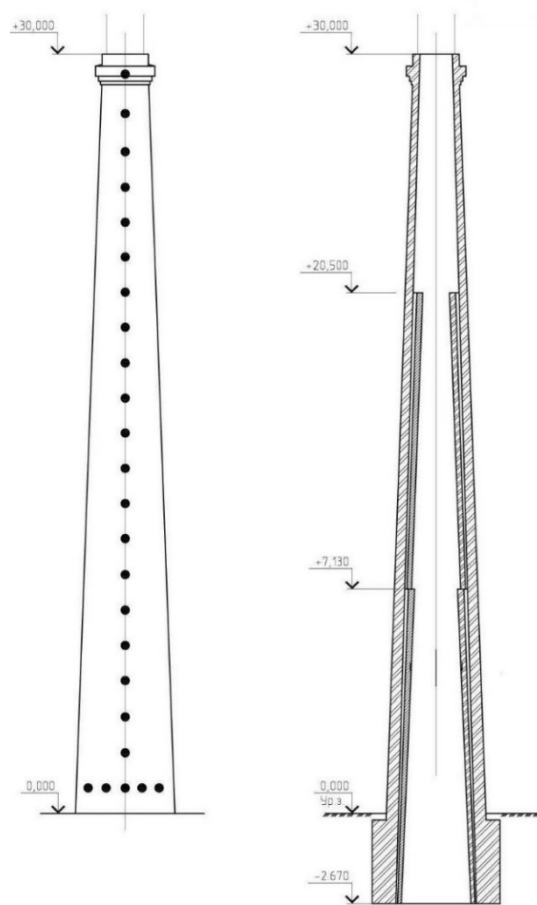


Рис. 1. Общий вид и схема элементов дымовой трубы
(• место замера прочности кирпичной кладки ствола дымовой трубы)

Остальные конструктивные элементы дымовой трубы находятся в работоспособном состоянии и не представляют опасности для ее безопасной эксплуатации.

Общеизвестно, что при сжигании метана, который в основном входит в состав природного газа, образуются водяные пары. Эти пары поступают в газоходы и дымовые трубы. Со временем режим эксплуатации котельной был изменен (ранее котельная работала на жидком топливе), и как следствие, произошло уменьшение тепловой нагрузки на котел. Таким образом, ограждающие конструкции дымовой трубы начали работу в условиях иного температурно-влажностного режима. Значительное понижение температуры дымовых газов и объема их выхода привело к тому, что при понижении температуры газов ниже точки росы на внутренних стенках ствола образовался конденсат. Длительное увлажнение стенок дымохода крайне отрицательно повлияло на несущую способность и прочностные свойства конструкции в целом. Следует отметить, что в

тех случаях, когда температура внутри поверхности ствола становится выше температуры точки росы, состояние, при котором образуется конденсат на его стенках не наступает [15]. Однако, это не мешает образованию того же конденсата внутри самой строительной конструкции. На температурное поле самой трубы значительное влияние оказывает температура наружного воздуха и выходящих газов. Это неизбежно приводит к тому, что, скопившаяся на стенках ствола дымовой трубы влага, будет иметь сезонный характер и находится в непосредственной зависимости от теплового режима эксплуатации объекта. Летом, когда котельная не работает (ее отключают на плановое обслуживание), влага, скопившаяся на стенах трубы, испаряется в атмосферу. Зимой, при отрицательных температурах влага накапливается и замерзает, что приводит к ее расширению. Это создает давление на кирпичную кладку и ведет в конечном итоге к образованию трещин и разрушению [16].



Рис. 2. Дефекты и повреждения наружной поверхности трубы



Рис. 3. Дефекты и повреждения внутренней поверхности трубы

Выводы. Все вышеперечисленные дефекты и повреждения дымовой трубы стали следствием снижения тепловой нагрузки на нее. Это привело к нарушению заложенного в проект режима эксплуатации, а затем к образованию на внутренних

стенках трубы конденсата, с последующим разрушением каменной кладки и коррозией металлических деталей трубы. Кроме того, свою отрицательную роль могла сыграть повышенная

влажность кирпичной кладки, которая в результате циклического замораживания (оттаивания) регулярно подвергалась разрушению.

Таким образом, экспертиза дымовой трубы, установленной на территории котельной, показала, что объект обследования не в полной мере соответствует требованиям промышленной безопасности. С учетом выявленных дефектов и повреждений состояние дымовой трубы определяется как ограниченно работоспособное. Для продолжения безопасной эксплуатации и сохранения ресурса дымовой трубы необходимо в установленные сроки провести ремонтно-восстановительные мероприятия и устранить все выявленные дефекты. При обнаружении каких-либо нарушений или режимов эксплуатации в дальнейшем следует при первой возможности остановки котлоагрегатов выполнить обследование конструкции трубы для обеспечения ее безопасной работы.

В заключении следует отметить, что обнаруженные вовремя дефекты и повреждения дымовых труб, их своевременное устранение могут значительно продлить срок безопасной эксплуатации не только самой трубы, но и всего промышленного объекта в целом. Проведение регулярных обследований снижает риск возникновения аварийных ситуаций на объектах, относящихся к категории повышенной опасности и, как следствие, улучшает экологическую безопасность региона.

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. Брюхань А.Ф. Идентификация зон техногенного загрязнения ландшафтов выбросами промышленных предприятий по данным спутниковых снимков снежного покрова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 181–184.
2. Серых И.Р., Чернышева Е.В., Дегтярь А.Н., Черноситова Е.С., Чернышева А.С. Экспертиза промышленной безопасности здания цеха ВЖС Шебекинского химического завода с целью оценки технического состояния конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 9. С. 55–61. DOI: 10.12737/article_5bab4a1cacc902.46271253.
3. Салов Ю.В., Семашко В.А., Варнашов В.В., Оверченко И.В., Горшенин С.Д. Повышение надежности и экологической безопасности

внешних газоходов и дымовых труб ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 2 (58). С. 54–57.

4. Шайбаков Р.А., Абдрахманов Н.Х., Четверик Н.П. Промышленная безопасность дымовых и вентиляционных промышленных труб // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 8. С. 70–73.

5. Володин Ю.Г., Марфина О.П., Цветкович М.С., Кирпичников А.П. Влияние технического состояния и режимов работы дымовых труб на окружающую среду // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 24. С. 130–135.

6. Коткова О.Н. Мониторинг безопасности дымовой трубы предприятия нефтехимии // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. № 3 (11). С. 81–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.16.

7. Глазков С.С., Седаев А.А., Чуйкин С.В. Снижение концентрации загрязняющих веществ в вентиляционных выбросах при неблагоприятных метеоусловиях и аварийных ситуациях // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1 (29). С. 91–98.

8. Коробов Л.А., Жарков А.Ф., Шерник А.О. Дымовые и вентиляционные трубы высотой 200–500 метров как пространственные сооружения. М.: Спутник, 2006. 124 с.

9. Буланов И.А., Якубовский Р.Ю., Олипер И.А., Пилуй Ю.В., Афримович Г.Г. Принципиальные подходы к оценке промышленной безопасности дымовых труб // Безопасность труда в промышленности. № 10. 2015. С. 100–102.

10. Волков А.С., Правук Л.Р. Дефекты и повреждения высотных железобетонных труб, методы ремонта и усиления // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 4 (120). С. 42–46.

11. Ладнушкин А.А., Антаков А.Б., Воронов А.А., Хасанов Р.М., Перельгин О.А. Дымовые трубы. Проблемы экспертизы // Безопасность труда в промышленности. 2005. № 2. С. 2–3.

12. Ходько А.А., Лебедев В.Г. О безопасной эксплуатации дымовых и вентиляционных труб опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. № 5. 2002. С. 26–27.

13. Красных Б.А., Субботин А.И., Богатов Н.Д., Зуев Г.П., Котельников В.С., Перепелицын А.И., Шаталов А.А. Методические указания по обследованию дымовых и вентиляционных промышленных труб (РД 03-610-03). Серия 03. Выпуск 40. М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2008. 52 с.

14. Кутын Н.Г., Субботин А.И., Перепелицын А.И., Зуев Г.П., Котельников В.С., Феоктистов А.А., Сидоров В.И., Печеркин А.С., Кловач

Е.В., Гонтаренко А.Ф., Белов М.И., Вербицкий Ю.В., Кокин А.А. Безопасность эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб: сборник документов. Серия 03. Выпуск 57. М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2009. 80 с.

15. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Каминский К.Д. Методика определения температуры точки

росы продуктов сгорания природного газа // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 6. С. 43–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.043-049.

16. Варнашов В.В., Киселев А.А., Гребнов В.С. Расчетные исследования режимов работы кирпичных дымовых труб в условиях эксплуатации // Вестник ИГЭУ. № 1. 2016. С. 18–26.

Информация об авторах:

Серых Инна Робертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. E-mail: inna_ad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернышева Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: bellena_74@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Серых Валерия Дмитриевна, бакалавр. E-mail: luruler44@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 1

Поступила 27.09.2024 г.

© Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д., 2025

^{1,*}Serykh I.R., ¹Chernyshova E.V., ²Serykh V.D.

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

²National Research Moscow State University of Civil Engineering

*E-mail: inna_ad@mail.ru

SMOKE STACK INDUSTRIAL SAFETY EXPERT REVIEW

Abstract. Chimneys are an integral part of the boiler house, since they are designed to remove and disperse fuel combustion products. Failure in their work will lead to a disruption in the uninterrupted supply of consumers with heat and electricity. As the service life of the structure increases, the likelihood of any defects or damage in it increases. Therefore, over time, the question arises of ensuring the safety of the use of such structures. To ensure uninterrupted and long-term operation of chimneys, it is necessary to periodically monitor their technical condition: to conduct scheduled inspections, without fail, eliminating the identified malfunctions.

The survey was carried out in order to determine the possibility of further operation of the industrial chimney. During the examination, defects and damage were established that could potentially affect the safe operation of the facility; the reasons for their occurrence were revealed. To assess the technical condition of the chimney, an analysis of the design solution, operating conditions of structural elements, as well as the quality of structures, materials and connections was carried out.

As a result of visual and measuring inspection, defects and damages were revealed that have the requirements for operation and lead to a violation of the design performance. The results presented in the article may be of interest to specialists of expert organizations that are engaged in the examination of industrial chimneys in order to assess the actual state of their structural elements.

Keywords: chimneys, defects and damages, industrial safety expert review.

REFERENCES

1. Bryuhan' A.F. Identification of zones of technogenic pollution of landscapes by emissions of industrial enterprises according to satellite images of snow cover. [Identifikaciya zon tekhnogennoy zagryazneniya landshaftov vybrosami promyshlennykh predpriyatij po dannym sputnikovyh snimkov snezhnogo pokrova]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 4. Pp. 181–184. (rus)

2. Serykh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar A.N., Chernositova E.S., Chernysheva A.S. Industrial safety expert review of the building of the WBS shop of the Shebekinsky chemical plant in order to assess the technical condition of the structures. [Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti zdaniya cekha VZhS Shebekinskogo himicheskogo zavoda s cel'yu ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp.

55–61. DOI: 10.12737/article_5bab4a1cacc902.46271253. (rus)

3. Salov Yu.V., Semashko V.A., Varnashov V.V., Overchenko I.V., Gorshenin S.D. Improving the reliability and environmental safety of external gas ducts and chimneys of thermal power plants. [Povyshenie nadezhnosti i ekologicheskoy bezopasnosti vnesnih gazohodov i dymovyh trub TES]. Energy saving and water treatment. 2009. No. 2 (58). Pp. 54–57. (rus)

4. Shajbakov R.A., Abdrahmanov N.H., Chetverik N.P. Industrial safety of smoke and ventilation industrial pipes. [Promyshlennaya bezopasnost' dymovyh i ventilyacionnyh promyshlennyh trub]. Industrial Safety. 2008. No. 8. Pp. 70–73. (rus)

5. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Cvetkovich M.S., Kirpichnikov A.P. Impact of technical condition and operation modes of chimneys on the environment. [Vliyanie tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov raboty dymovyh trub na okruzhayushchuyu sredu]. Bulletin of the University of Technology. 2015. Vol. 18. No. 24. Pp. 130–135. (rus)

6. Kotkova O.N. Monitoring the safety of the chimney of the petrochemical enterprise. [Monitoring bezopasnosti dymovoy truby predpriyatiya neftekhimii]. Bulletin of SGASU. Urban planning and architecture. 2013. No. 3 (11). Pp. 81–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.03.16. (rus)

7. Glazkov S.S., Sedaev A.A., Chujkin S.V. Reduction of concentration of pollutants in ventilation emissions under adverse weather conditions and emergency situations. [Snizhenie koncentracii zagryaznyayushchih veshchestv v ventilyacionnyh vybrosah pri neblagopriyatnyh meteousloviyah i avariynih situatsiyah]. Scientific Bulletin of VGASU. Construction and architecture. 2013. No. 1 (29). Pp. 91–98. (rus)

8. Korobov L.A., Zharkov A.F., Shernik A.O. Smoke and ventilation stacks 200–500 meters high as spatial structures. [Dymovye i ventilyacionnye truby vysotoj 200–500 metrov kak prostranstvennye sooruzheniya.]. M.: Sputnik, 2006. 124 p. (rus)

9. Bulanov I.A., Yakubovskij R.Yu., Oliper I.A., Piluj Yu.V., Afrimovich G.G. Principal approaches to assessment of industrial safety of chimneys. [Principial'nye podhody k ocenke promyshlennoj bezopasnosti dymovyh trub]. Industrial Safety. 2015. No. 10. Pp. 100–102. (rus)

10. Volkov A.S., Pravuk L.R. Defects and damages of high-rise reinforced concrete pipes, repair

and reinforcement methods. [Defekty i povrezhdeniya vysotnyh zhelezobetonnyh trub, metody remonta i usileniya]. Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2016. No. 4 (120). Pp. 42–46. (rus)

11. Lаднushkin A.A., Antakov A.B., Voronov A.A., Hasanov R.M., Pereygin O.A. Chimneys. Examination problems. [Dymovye truby. Problemy ekspertizy]. Industrial Safety. 2005. No. 2. Pp. 2–3. (rus)

12. Hod'ko A.A., Lebedev V.G. On safe operation of smoke and ventilation stacks of hazardous production facilities. [O bezopasnoj ekspluatatsii dymovyh i ventilyacionnyh trub opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov]. Industrial Safety. 2002. No. 5. Pp. 26–27. (rus)

13. Krasnyh B.A., Subbotin A.I., Bogatov N.D., Zuev G.P., Kotelnikov V.S., Perepelitsyn A.I., Shatalov A.A. Methodical Guidelines for Inspection of Smoke and Ventilation Industrial Pipes (RD 03-610-03). Series 03. Issue 40. [Metodicheskie ukazaniya po obsledovaniyu dymovyh i ventilyacionnyh promyshlennyh trub (RD 03-610-03). Seriya 03. Vypusk 40]. M: JSC “Scientific and Technical Center for Safety in Industry”, 2008. 52 p. (rus)

14. Kut'in N.G., Subbotin A.I., Perepelitsyn A.I., Zuev G.P., Kotelnikov V.S., Feoktistov A.A., Sidorov V.I., Pecherkin A.S., Klovach E.V., Gontarenko A.F., Belov M.I., Verbickij Yu.V., Kokin A.A. Operation safety of industrial smoke and ventilation pipes: collection of documents. Series 03. Issue 57. [Bezopasnost' ekspluatatsii promyshlennyh dymovyh i ventilyacionnyh trub: sbornik dokumentov. Seriya 03. Vypusk 57]. M: JSC “Scientific and Technical Center for Safety in Industry”, 2009. 80 p. (rus)

15. Biryukov A.B., Lebedev A.N., Kaminskij K.D. Procedure for Determination of Dew Point of Natural Gas Combustion Products. [Metodika opredeleniya temperatury tochki rosy produktov sgoraniya prirodnogo gaza]. Bulletin of Ivanovo State Energy University. 2023. No. 6. Pp. 43–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.043-049. (rus)

16. Varnashov V.V., Kiselev A.A., Grebnev V.S. Design studies of operation modes of brick chimneys under operating conditions. [Raschetnye issledovaniya rezhimov raboty kirpichnyh dymovyh trub v usloviyah ekspluatatsii]. IGEU Bulletin. 2016. No. 1. Pp. 18–26. (rus)

Information about the authors

Serykh, Inna R. PhD, Assistant professor. E-mail: inna_ad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernyshova, Elena V. PhD, Assistant professor. E-mail: bellena_74@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Serykh, Valeriya D. Bachelor student. E-mail: luruler44@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received 27.09.2024

Для цитирования:

Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д. Экспертиза промышленной безопасности дымовой трубы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-40-48

For citation:

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D. Smoke stack industrial safety expert review. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-40-48

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-49-67

***Трубаев П.А., Кошлич Ю.А., Белоусов А.В., Буханов Д.Г., Гребеник А.Г., Прасол Д.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: trubaev@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ

Аннотация. В настоящее время сложилось мнение, что отопление с использованием тепловых насосов эффективно только в регионах с теплым климатом. В работе произведена оценка показателей работы теплонасосных установок (ТНУ) для шести типичных российских регионов с ГСОП от 2526 до 10360. Так как затраты энергии в теплонасосном цикле зависят от разности температур холодного и горячего теплоносителя, для расчета использовалась фактическая среднесуточная температура наружного воздуха за 2014–2023 г. Предложена методика термодинамического расчета теплонасосного цикла и определения энергопотребления при различной температуре наружного воздуха в моновалентном и бивалентном режимах. Для оценки эффективности использовались три показателя: среднегодовые затраты энергии в фактических климатических условиях; стоимость жизненного цикла проекта, включающее сумму затрат на сооружение ТНУ с грунтовым теплообменником и затраты электроэнергии за время эксплуатации; затраты первичного топлива, которые предложено рассчитывать с использованием показателей работы энергосистем регионов. Сделан вывод, что ТНУ могут использоваться для отопления при любом климате, так как их эффективность зависит не от температуры наружного воздуха, а от принятого температурного графика системы отопления. В более холодных регионах эффективность тепловых насосов несколько ниже не из-за более низких температур, а из-за того, что большая доля дней отопительного сезона приходится на температуры, близкие к минимальным для этого региона. Во всех регионах, с учетом стоимости в них энергоносителей, затраты на электроэнергию при отоплении ТНУ ниже, чем стоимость тепловой энергии централизованного теплоснабжения, но почти в два раза больше по сравнению с газовым или твердотопливным отоплением. При сравнении затрат при использовании 79 фреонов наиболее энергоэффективными во всех регионах оказались одинаковые соединения, что подтверждает независимость параметров работы ТНУ от климатических условий.

Ключевые слова: тепловой насос, отопление, температурный график, качественное регулирование, коэффициент трансформации

1. Введение

1.1. Актуальность электрического отопления зданий. Системы электрического отопления имеют ряд преимуществ перед централизованным теплоснабжением или индивидуальным отоплением с использованием топлива: удобство эксплуатации и регулирования, большую безопасность по сравнению с использованием природного газа, значительно более низкие расходы на обслуживание теплогенерирующего и теплоиспользующего оборудования, отсутствие выбросов по сравнению с индивидуальным отоплением на твердом и жидком топливе и др. [1]. Использование электроотопления смещает пиковый спрос на электроэнергию и сглаживает его величину [2]. Препятствием для использования электрического отопления является высокая стоимость электроэнергии и необходимость увеличения мощности электросетей для обеспечения значительного возрастания нагрузки. Но кроме экономической целесообразности электроотопление может решать экологические проблемы, ликвидируя источники выбросов от индивидуального

отопления, что для ряда регионов является актуальной задачей. В настоящее время в Правительстве РФ в рамках реализации федерального проекта «Чистый воздух» рассматривается вопрос перевода с угольного на электрическое отопление более 130 тыс. домов в Красноярском крае, республиках Хакасия, Тыва и Бурятия, где не планируется газификация с использованием сетевого природного газа, в 2024 году в этих регионах реализуются пилотные проекты.

Применение при электроотоплении теплонасосных установок (ТНУ) позволяет в несколько раз снизить потребляемую мощность, необходимую для отопления, так как в ТНУ энергия используется не для прямого нагрева, а для передачи теплоты от окружающей среды в помещении с повышением ее температурного потенциала.

По данным Международного энергетического агентства (<https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>) в мире тепловые насосы обеспечивают отопление 10 % зданий, суммарная установленная мощность ТНУ в 2021 г. составляет 1062 ГВт (46 % – Северная Америка;

19 % – Европа; 15 % – Япония и Корея; 14 % – Китай). Исследование [3] показало, что применение ТНУ имеет преимущество перед традиционными системами отопления в эксплуатационных затратах, но размер экономии зависит от местных климатических условий и соотношения между ценой на электроэнергию и ценой на газ. Применение ТНУ экономически выгодно в следующих случаях: а) на территориях, где отсутствует возможность газоснабжения или стоимость присоединения является крайне высокой; б) в зданиях с электроотоплением и невозможности использования других источников теплоты. В России ТНУ крайне мало распространены, что вызвано дешевой природного газа.

1.2. Особенности применения ТНУ для регионов с холодным климатом. В зарубежных странах наиболее широко распространены ТНУ типа «воздух»–«вода» и установленная мощность геотермальных тепловых насосов (типа «вода»–«вода») составляет всего 77,6 ГВт [4], но воздушные тепловые насосы эффективны при температурах наружного воздуха выше 0 °C [5], и их применение в странах с холодным климатом ограничено образованием наледи на теплообменнике испарительного блока [6]. Поэтому при низких температурах наружного воздуха необходимо использование геотермальных теплонасосных установок, использующих теплоту земного грунта с помощью заложённых в него теплообменников, которые обеспечивают стабильную температуру холодного низкопотенциального источника при различной температуре наружного воздуха [7, 8], при этом наиболее эффективными будут вертикальные грунтовые теплообменники [9]. По сравнению с воздушными тепловыми насосами геотермальные ТНУ более компактны, характеризуются меньшим уровнем шума, а также имеют более низкие эксплуатационные расходы, но требуют больших капитальных затрат, места и возможности для монтажа грунтового теплообменника, а также более низкую эффективность, когда температура воздуха выше температуры грунта [10].

В работе [11] отмечается сложность прямого использования импортных тепловых насосов, особенно для регионов с низкими температурами. Это связано с тем, что коэффициент преобразования теплоты теплонасосного цикла зависит от разности температур испарения и конденсации фреона, то есть как от температуры вырабатываемой горячей воды, так и от температуры среды, из которой теплота отбирается. Таким образом, эффективность работы теплового насоса зависит от температуры наружного воздуха [11] и ТНУ, сконструированные для более мягкого

климата, в Российских условиях будут работать менее эффективно.

В работе [12] сделан вывод, что при использовании для отопления теплонасосных установок важным фактором является выбор оптимального уровня энергозащиты зданий в конкретных климатических условиях. Это подтверждают и зарубежные исследователи, в обзорной работе [7] указывается, что тепловые насосы могут эффективно заменить традиционные системы отопления старых домов только при их теплоизоляции, что увеличивает затраты на применение ТНУ, а в работе [13] отмечается, что реконструкция ограждающих конструкций зданий увеличивает сроки окупаемости, но позволяет снизить необходимый температурный уровень теплоносителя и уменьшить мощность ТНУ и затраты энергии.

Сезонные колебания температуры грунта наблюдаются на глубинах 15–20 м [14], ниже этой границы температура грунта стабилизируется с величиной около 8...10 °C, и на большей глубине она начинает увеличиваться. Нормативная глубина промерзания для разных регионов России согласно СП 131.13330.2020 составляет от 0,23...0,34 м (Краснодар) до 2,2...3,3 м (Сургут).

Проблемой при эксплуатации геотермальных тепловых насосов является вымораживание грунта в месте укладки грунтового теплообменника. Исследования [15] показали, что в начальный период эксплуатации понижение температуры грунта к концу отопительного сезона не успевает компенсироваться в летний период года. Температура грунта стабилизируется к пятому году эксплуатации. При исследовании работы ТНУ в условиях грунтов, характерных для московского региона, снижение температурного потенциала извлекаемой теплоты составило 5...6 °C, процесс стабилизируется к 15-му году эксплуатации [12]. При этом максимальное падение, до 10 °C, наблюдается в зимние месяцы на глубине до 40 м, минимальные, менее 5 °C в осенне-весенний период и на глубине более 100 м [16]. В работе [9] в результате моделирования установлено, что за течение 20 лет эксплуатации средняя температура стенки скважины увеличилась на 1,55 °C в жарком климате и уменьшилась на 3,1 °C и 2,24 °C в холодном и мягком климате. Таким образом, при оценке многолетнего периода эксплуатации необходимо принимать более низкую температуру грунта, чем в справочных климатических данных. Следует отметить, что в условиях вечной мерзлоты вымораживание грунта является преимуществом, т.к. осуществляет защиту мерзлого грунта от протаивания [17]. Так же в условиях дефицита места возможно организация работы нескольких ТНУ с

общим контуром, что так же снизит удельную стоимость систем [10].

1.3. Низкотемпературные системы отопления зданий. При использовании низкотемпературной системы отопления (теплые полы в сочетании с водо-воздушными теплообменниками – фанкойлами) отопление объекта может быть обеспечено только тепловыми насосами (моновалентный режим). Но это требует высоких капиталовложений для оборудования системы отопления. Альтернативой является использование бивалентного режима, в котором тепловой насос работает совместно с электронагревателем, обеспечивающим пиковый нагрев или догрев воды при больших тепловых нагрузках. Это увеличивает затраты потребляемой энергии, но позволяет значительно снизить стоимость системы за счет теплового насоса меньшей мощности и системы отопления с низкотемпературными радиаторами, а также устанавливать тепловые насосы на существующие объекты без их реконструкции. В работе [18] установлено, что отопление ТНУ эффективно до температур наружного воздуха не ниже 15°C, при более низких температурах необходим пиковый догрев. В работе [12] для 23 городов РФ выполнено моделирование работы теплонасосных установок в условиях нестационарного теплового режима геотермальных ТНУ при многолетней эксплуатации и по критерию минимальных суммарных затрат электроэнергии установлено оптимальное соотношение мощности теплового насоса и пикового догревателя, которое составило от 0 на Юге России до ~ 2,92 в Якутске, а доля теплоты, вырабатываемая пиковым нагревателем составила 0 % на Юге России, 5..7 % для средней части России и 38...40 % в Якутске и Туре.

Тепловые насосы смогут обеспечить отопление в любом климате при условии возможности передачи в помещение необходимого количества теплоты. В работе [13] отмечается, что модернизация традиционных систем отопления на низкотемпературные должна изучаться в каждом конкретном случае с учетом возможности сохранения существующих радиаторов или их модернизации. Кроме того, система «теплый пол», часто применяемая при отоплении с использованием ТНУ, обладает санитарными ограничениями по температуре поверхности, что не позволяет её использовать как единственный источник отопления при низких температурах. Применение воздушного отопления в низкотемпературных системах малоэффективно [19]. Для работы в низкотемпературных системах отопления обычно используют стальные панельные водяные радиаторы. Для систем отопления могут рассматриваться стальные панельные водяные радиаторы

типа «33» (толщина 150 мм) со следующими характеристиками теплоотдачи в пересчете на площадь вертикальной поверхности (рассчитано по техническим данным производителя <https://kermi-fko.ru/raschety/calc-kermi.aspx>):

$\Delta t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (95/70 $^{\circ}\text{C}$): 5,6 кВт/м²;

$\Delta t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70/50 $^{\circ}\text{C}$): 3,1 кВт/м²;

$\Delta t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (60/40 $^{\circ}\text{C}$): 2,0 кВт/м²;

$\Delta t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (50/40 $^{\circ}\text{C}$): 1,7 кВт/м²;

где Δt – разность средней температуры системы отопления и воздуха.

Для сравнения, при $\Delta t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплоотдача с вертикальной поверхности алюминиевых радиаторов 3,7...4,3 кВт/м², чугунных – около 2 кВт/м². Таким образом, низкотемпературная система отопления требует установки радиаторов с сопоставимой площадью с чугунными и с площадью примерно в два раза больше, чем у алюминиевых.

1.4. Хладагенты тепловых насосов. Работа тепловых насосов, кондиционеров и холодильных машин основана на циклическом испарении рабочего агента (холодильного агента, хладагента), который отбирает теплоту у низкопотенциального теплоносителя, и после повышения давления конденсируется при более высоких температурах, нагревая высокопотенциальный теплоноситель [20]. Основная работа в тепловом насосе затрачивается на сжатие хладагента. В теплонасосных циклах можно использовать практически любое газообразное или жидкое соединение. Например, возможно использовать воду, испаряя ее при температуре 0 $^{\circ}\text{C}$ и абсолютном давлении 0,61 кПа (0,006 атм.) и конденсируя при температурах 40–60 $^{\circ}\text{C}$ и абсолютном давлении 7,4...20 кПа (0,07...0,20 атм.), но технически обеспечение работы агрегата с таким разрежением потребует значительного увеличения стоимости и сложности устройств, и в бытовых приборах реализация такого цикла невозможна. Основное термодинамическое требование к хладагентам можно сформулировать следующим образом: кипение при требуемой температуре при давлениях, выше атмосферного, но близкого к нему (что бы в системе не было высокого давления), и конденсация при требуемых температурах ниже критических параметров. Так же для уменьшения стоимости теплового насоса необходимы высокая удельная теплота фазовых переходов при рабочих температурах с целью уменьшения расхода хладагента, для эффективной эксплуатации – высокая теплопроводность и низкая вязкость.

Но наряду с техническими, к озонам выдвигают и экологические требования. В начале 70-х годов прошлого века была выдвинута гипотеза, что фреоны после утечек их оборудования поднимаются в стратосферу и разрушают озоновый

слой [21]. Данная гипотеза научно подтверждена не была, а долговременные исследования показали, что на колебания содержания озона в атмосфере влияют климатические, а не антропогенные факторы [22], но, тем не менее, были приняты политические решения, оформленные в 1987 г. Монреальским протоколом о запрете производства и использования фторсодержащих фреонов [21], что заметно отразилось на отрасли производства хладагентов. Распространенные для тепловых насосов фреоны R11, R12, R114, R500 и др. с потенциалом разрушения озонового слоя $ODP = 0,1 \dots 1$ были выведены из обращения с заменой на фреоны R22 ($ODP = 0,05$) и R407C, R410A, R134A, R32 ($ODP = 0$). Так как влияние фреонов на озоновый слой доказано не было, в настоящее время внедряются другие критерии GWP и TEWI, оценивающие влияние фреонов на потенциал глобального потепления [23], что приводит к уже второму изменению глобального рынка хладагентов и озонобезопасные фреоны с высоким потенциалом глобального потепления GWP постепенно выводятся из обращения [24]. В работе [24] на основании анализа 40 фреонов по холодопроизводительности и КПД цикла установлено, что альтернативой для фреонов R134a и R410A являются соответственно R513a и R466A, а альтернативы R404A имеют свои преимущества и недостатки. В работе [25] в качестве замены R134a для циклов с перегревом предлагается R152a, а в работе [26] предлагается для условий холодного климата (от -25°C до 5°C) использовать в бытовых тепловых насосах бинарные азеотропные смеси, состоящие из диоксида углерода и хладагента с низким GWP, наилучшие результаты показала смесь 90 % R32 и 10 % CO_2 .

Таким образом, в настоящее время указанные решения привели к необходимости замены широко используемых ранее фреонов на другие, которые обладают значительно более худшими

эксплуатационными свойствами и в несколько раз дороже, но которые безальтернативно выпускаются промышленностью. В большинстве тепловых насосов обычно используются хладагенты R407C, R404A, R410A, R417A, R134A.

1.5. Цели и задачи работы. На основании анализа существующего положения можно заключить, что из-за высокой стоимости тепловых насосов, зависимости эффективности теплонасосного цикла от температуры источника и приемника и от используемого хладагента (фреона), снижения эффективности работы ТНУ в условиях низкой температуры наружного воздуха, необходимо выбирать конструкцию и режимы работы теплового насоса с учетом климатических условий его использования, так как технико-экономическое обоснование на основе паспортных характеристик ТНУ не отражает его реальные режимы работы и эффективность.

Целью работы являлось оценка эффективности работы теплонасосных установок для типичных российских регионов с использованием фактической температуры наружного воздуха и сравнение затрат на отопление теплонасосными установками с другими способами отопления.

2. Методы, используемые в работе

2.1. Метод расчета затрат электроэнергии в геотермальной теплонасосной установке. Расчет разработан на основании методики термодинамического расчета теплонасосного цикла работы [20]. Расчет заключается в определении температуры вырабатываемого теплоносителя по температуре наружного воздуха, определение коэффициента преобразования энергии COP при заданной температуре и затрат электроэнергии на работу теплового насоса. Рассматривался цикл с перегревом пара во внутреннем регенеративном теплообменнике (рис. 1), который в холодных климатических условиях повышает надежность работы ТНУ [27].

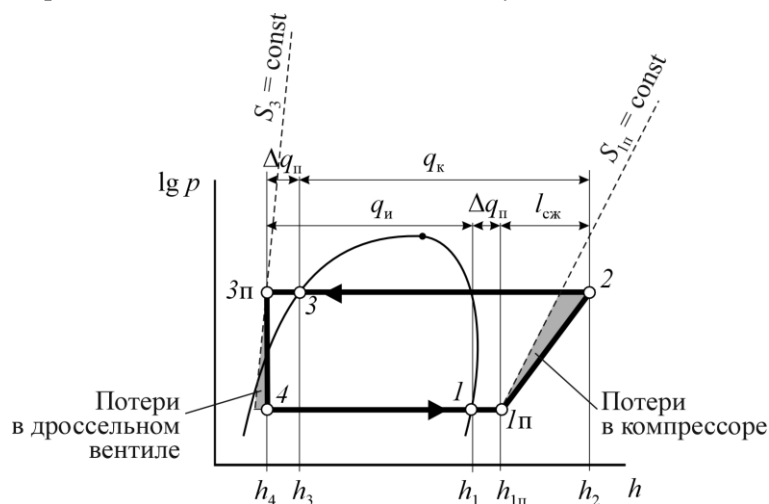


Рис. 1. Теплонасосной цикл в диаграмме давление–энтальпия и тепловой баланс

Теплота испарения
(отобранная теплота грунта):

$$q_n = h_1 - h_4$$

Теплота конденсации
(выработанная теплота):

$$q_k = h_2 - h_3$$

Теплота, передаваемая
в промежуточном перегревателе:

$$\Delta q_n = h_{1п} - h_1 = h_3 - h_{3п}$$

Тепловой баланс:

$$q_n + l_{сж} = q_k$$

Коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu = q_k / l_{сж}$$

Коэффициент преобразования энергии:

$$COP = \mu / \eta_{вн.э.}$$

В бивалентном режиме, используемом при низких температурах, нагрев воды сначала происходит в тепловом насосе с последующим догревом в электродкотле.

Исходные данные для расчета:

а) $t_{н\text{ мин}}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления, °С (средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 92 %);

б) $q_{от\text{ max}}$ – мощность отопления при расчетной температуре $t_{н\text{ мин}}$, кВт;

в) $t_{в}$ – температура воздуха в помещении, °С;

г) тип фреона;

д) $t_{под\text{ гр}}$, $t_{об\text{ гр}}$ – температура подающей и обратной воды, °С, при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления (температурный график отопительной системы);

е) $t_{г1}$, $t_{г2}$ – температуры теплоносителя геотермального контура на входе и выходе теплового насоса, °С;

ж) t_{hi} – данные со значениями среднесуточной температуры за рассчитываемый период, °С;

з) $t_{н0}$ – температура наружного воздуха, при которой включается отопление, °С;

и) $t_{нб}$ – температура наружного воздуха в точке бивалентности, °С, ниже которой происходит

$$q_{от} = (q_{от\text{ max}} - q_{вн} - q_{инс}) \cdot (t_{в} - t_{н}) / (t_{в} - t_{н\text{ мин}}) + q_{вн} + q_{инс}, \text{ кВт.} \quad (1)$$

1.3. Температуры испарения $t_{и}$ и конденсации $t_{к}$ фреона, °С:

$$t_{и} = t_{г2} - \Delta t_{и}, \quad t_{к} = t_{под} + \Delta t_{к}. \quad (3)$$

1.4. Давление кипения $p_{и}$ и конденсации $p_{к}$ фреона, МПа:

$$p_{и} = p'(t_{и}); \quad p_{к} = p''(t_{к}), \quad (4)$$

где $p'(t)$, $p''(t)$ – функции зависимости давления насыщенной жидкости и пара от температуры.

1.5. Удельная энтальпия фреона в состоянии насыщения после испарителя h_1 и конденсатора h_3 , кДж/кг:

$$h_1 = h'(t_{и}); \quad h_3 = h''(t_{к}), \quad (5)$$

где $h'(t)$, $h''(t)$ – функции зависимости удельной энтальпии насыщенной жидкости и пара от температуры.

1.6. Удельная энтальпия пара после перегрева $h_{1п}$, кДж/кг:

$$h_{1п} = h_{pi}(p_{и}, t_{и} + \Delta t_{п}), \quad (6)$$

где $h_{pi}(p, t)$ – функция зависимости удельной энтальпии перегретого пара от давления и температуры.

1.7. Удельная энтальпия фреона после компрессора h_2 , кДж/кг:

$$h_2 = h_{1п} + [h_{sp}(S_{pi}(p_{и}, t_{и} + \Delta t_{п}), p_{к}) - h_{1п}] / \eta_{к}, \quad (7)$$

где $h_{sp}(S, t)$ – функция зависимости удельной энтальпии перегретого пара от энтропии и температуры; $S_{pi}(p, t)$ – функция зависимости удельной энтропии перегретого пара, кДж/кг, от давления

длит дополнительный нагрев воды после теплового насоса в электронагревателе (если $t_{нб} = t_{в}$, тепловой насос не включается и вода нагревается только электронагревателем, при $t_{нб} \gg t_{н\text{ мин}}$ отопление производится только тепловым насосом);

к) $\Delta t_{и}$, $\Delta t_{к}$, $\Delta t_{п}$ – температурные перепады в испарителе, конденсаторе и температура перегрева пара в перегревателе, °С.

1. Порядок расчета для температуры наружного воздуха $t_{н}$.

1.1. Температура прямой $t_{под}$ и обратной $t_{об}$ воды определяется по температурному графику с использованием формул работы [28].

1.2. Пересчет отопительной мощности на фактическую температуру наружного воздуха производится на основании выражения [28]

$$q_{от} = q_{от\text{ max}} (t_{в} - t_{н}) / (t_{в} - t_{н\text{ мин}}), \text{ кВт.} \quad (1)$$

Затраты отопления, рассчитанные по этому общепринятому способу, являются завышенными, так как не учитываются внутренние тепловыделения здания $q_{вн}$ и приход энергии от инсоляции $q_{инс}$, входящие в значение $q_{от\text{ max}}$ и составляющие 5–15 % от его величины. Их учет может быть произведен следующим образом:

и температуры; $\eta_{к}$ – адиабатный КПД компрессора.

1.8. Коэффициент преобразования энергии (соотношение выработанной тепловым насосом энергии к потребленной):

$$\text{COP} = \eta_{вн.э} (h_2 - h_3) / (h_2 - h_{1п}), \quad (8)$$

где $\eta_{вн.э} = \eta_{эм} \cdot \eta_{эд} \cdot (1 - d_{упр})$ – внутренний электрический КПД теплового насоса, включающий электромеханический КПД компрессора $\eta_{эм}$; КПД электродвигателя $\eta_{эд}$; $d_{упр}$ – доля затрат энергии на работу управляющего и дополнительного оборудования.

1.9. Мощность, потребляемая теплонасосной установкой, кВт,

$$e_{тн} = q_{от} / \text{COP}. \quad (9)$$

Для расчета термодинамических свойств фреона $p'(t)$, $p''(t)$, $h'(t)$, $h''(t)$, $h_{pi}(p, t)$, $h_{sp}(p, t)$, $S_{pi}(p, t)$ используется функции библиотеки RefProp.

2. Определение мощности теплового насоса $e_{тнб}$ и отопительной нагрузки $q_{отб}$ в точке бивалентности производится по алгоритму п. 1 при $t_{н} = t_{б}$: $q_{отб} = q_{от}$; $e_{тнб} = e_{тн}$.

3. Определение затрачиваемой мощности на отопление $e_{оти}$, кВт при температуре наружного воздуха $t_{ни}$:

а) если $t_{ни} \geq t_{н0}$, то $e_{оти} = 0$;

а) если $t_{ни} \geq t_{нб}$, то производится расчет по методике п. 1 и $e_{оти} = e_{тн}$;

б) если $t_{hi} < t_{hb}$, производится расчет отопительной нагрузки q_{oti} по выражениям (1) или (2) и затрачиваемая мощность на отопление определяется по выражению:

$$e_{oti} = e_{thb} + (q_{oti} - q_{thb}). \quad (10)$$

Затраты электрической энергии на отопление за сутки E_{oti} , кВт·ч:

$$E_{oti} = 24 e_{oti}. \quad (11)$$

4. Расчет затрат на отопление $E_{от}$, кВт·ч, за период

$$E_{от} = \sum E_{oti}. \quad (12)$$

Предложенный алгоритм позволяет рассчитывать затраты на отопление с использованием фактических климатических данных. Для выполнения анализа алгоритм реализован в виде программы на языке программирования VBA в виде функции пользователя и подпрограммы электронных таблиц Excel.

2.2. Климатические данные. Для исследования выбраны шесть городов с расчетным ГСОП от 2526 до 10360 (табл. 1). Норильск расположен в районе вечной мерзлоты.

Для расчета эффективности использовались архив климатических данных метеостанций за 10 лет (с 2014 по 2023 г.), содержащий фактическую температуру воздуха, измеряемую с интервалом от 30 мин до 3 часов. По архивным данным была рассчитана среднесуточная температура. Если в городах наряду с метеостанцией имеется метеостанция аэропорта, расположенного в черте города или недалеко от него, данные с двух метеостанций усреднялись. Время включения теплового насоса (дни отопительного периода) определялось значением среднесуточной температурой ниже 8°C . Продолжительность отопительного периода при этом получалась меньше, чем установленных в населенных пунктах распоряжениями местной администрации. Например, в Белгороде отопительный период в 2023 году был начат 10 октября, но после 39 суток была теплая погода и среднесуточная температура поднималась до 15°C , и только 18 ноября пять дней подряд среднесуточная температура стала менее 8°C .

Таблица 1

Климатические данные регионов

Город	Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярск	Сургут	Норильск
Расчетные параметры (свод правил СП 131.13300.2020 «Строительная климатология»)						
Температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,95, $^\circ\text{C}$ ($t_{n \min}$)	-15	-24	-29	-37	-42	-47
Период со средней суточной температурой воздуха 8°C						
температура, $^\circ\text{C}$	2,7	-1,9	-3,6	-6,6	-9,3	-15
продолжительность, сут.	146	187	214	234	254	296
ГСОП, $^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$	2526	4095	5050	6224	7442	10360
Фактические данные за 2013-2023 г. (использовался архив погоды с сайта gp5.ru)						
Идентификатор метеостанции (WMO ID, METAR)	34920, URKK	34214, UUOB	27347	UNKL	23849, USRR	23078, UOOO
Зафиксированные температуры						
минимальная	-26	-27,4	-35,7	-43	-52	-50,4
максимальная	38,7	35,1	34,3	35	34,5	31
Период со средней суточной температурой воздуха 8°C						
температура, $^\circ\text{C}$	3,7	-0,3	-2,1	-3,9	-5,4	-7,8
продолжительность, сут.	133	174	204	258	272	352
ГСОП, $^\circ\text{C} \cdot \text{сут.}$	2167	3534	4507	6173	6903	9790

Анализа фактических климатических данных (рис. 2) показывает заметное потепление во всех населенных пунктах, кроме Красноярска, и уменьшение ГСОП отопительных периодов за 10 лет на величину от 2 до 18 %. Предполагается, что потепление продолжится и поэтому предлагаемый расчет с использованием фактических погодных данных не приведет к снижению затрат на отопление и потребление энергоресурсов последующие периоды.

На рис 3. представлено среднее количество

дней в году с разной температурой воздуха.

При качественном регулировании водяных систем отопления температура воды обратно зависит от температуры наружного воздуха t_n . Максимальная температура должна быть при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления $t_{n \min}$. Так как эффективность ТНУ зависит от температуры нагрева воды, то для него важны не значения t_n , а распределение дней на интервале от температуры, при которой

принято включать отопление ($8\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $t_{\text{н min}}$, которое представлено на рис. 3. Например, в Норильске доля дней с температурой ниже середины интервала температур отопительного периода $(-47 + 8)/2 = -19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 30 %, а в Краснодаре доля дней с температурой ниже $(-15 +$

$8)/2 = -3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ только 7 %. Поэтому эффективность ТНУ, осуществляющих качественное регулирование отпускаемой теплоты, в более теплых регионах будет выше, так как они большую долю времени вырабатывают теплоноситель с более низкой температурой.

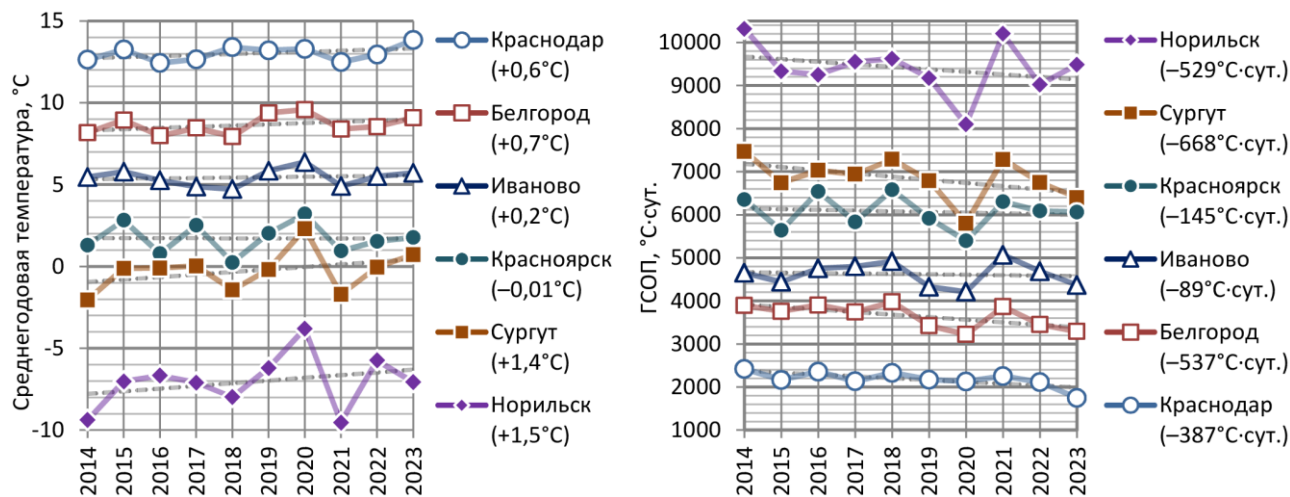


Рис. 2. Изменение климата за 10 лет

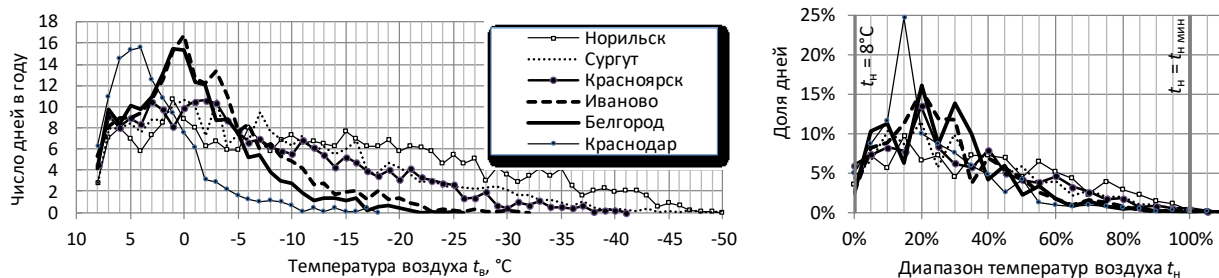


Рис. 3. Среднее (за 10 лет) число и доля дней в году с разной температурой воздуха

2.3. Стоимость энергоресурсов и ТНУ. На эффективность работы тепловых значительное влияние оказывает соотношение стоимости энергетических ресурсов. В работе [29] показано, что фактические затраты денежных средств на отопление жилого трехэтажного энергоэффективного многоквартирного дома с проектным классом энергетической эффективности «А++» – высочайший и фактическим (по затратам на отопление) «В» – высокий, построенного в г. Белгороде, с использованием теплонасосных насосов, оказались выше, чем затраты обычных зданий с классами «D – нормальный» и «E – пониженный», в которых используется индивидуальное газовое отопление.

Это обусловлено соотношением стоимости природного газа и электрической энергии. Стоимость единицы энергии во втором квартале 2024 г. в г. Белгороде для населения составляет:

- тепловая энергия 585,5 руб./ГДж;
- электрическая энергия 1 036 руб./ГДж

(тариф для населения, использующих электроэнергию для отопления), или 1 480 руб./ГДж

(обычный тариф);

– природный газ 235 руб./Гкал
(277 руб./Гкал с учетом КПД газового котла / котельной).

При таком соотношении стоимости энергоресурсов даже при экономии электроэнергии в тепловом насосе в 3 раза стоимость 1 ГДж теплоты, вырабатываемой тепловым насосом для отопления, составит 345 руб./ГДж, и будет в 1,5 раза выше, чем для газового отопления. Поэтому тепловые насосы выгодно применять при отсутствии возможности использования газового отопления для замены электроотопления. Для централизованного отопления затраты на отопление в ТНУ сопоставимы с централизованным при $\text{COP} \approx 2$.

В табл. 2 приведены используемые в расчетах тарифы, приведенные на сайтах региональных энергетических комиссий, для сравнения стоимость тепловой энергии, природного газа и угля пересчитана на размерность «кВт·ч».

Таблица 2

Тарифы на энергетические ресурсы для населения во II полугодии 2024 г.

Энергоресурс	Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярск	Сургут	Норильск
Тепловая энергия, руб./Гкал (руб./кВт·ч)	2426,89 (2,09)	2451,4 (2,11)	2 623,70 (2,26)	2 584,85 (2,22)	2365,79 (2,03)	1 707,43 (1,47)
Электрическая энергия (одноставочный тариф, первый диапазон), руб./кВт·ч						
для домов без электроплит и электроотопления	6,53	5,33	6,19	5,23 (в пределах социальной нормы), 5,69 – свыше	3,75	3,53
для домов с электроплитами и электроотоплением	4,57	3,73	4,33	3,983*	3,63	2,47
Природный газ, руб./тыс. м ³ (руб./кВт·ч, с учетом КПД котла)	7140 (0,93)	8246,48 (1,08)	6850** (0,90)	–	5737,01 (0,75)	–
Уголь, руб./т*** (руб./кВт·ч, с учетом КПД котла)	–	–	–	14280,07 (2,55)	3259,19 (0,58)	–

* Тариф сверх социальной нормы

** Для нужд отопления

*** Средняя стоимость за июль-октябрь 2024 г. (https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/sred_potreb_cen_10-2024.xlsx)

Указанные тарифы включают НДС и актуальны для населения. В случае оплаты энергоресурсом юридическим лицом тарифы или их стоимость изменятся и могут быть как выше, так и ниже установленных для населения. Например, электроэнергия для потребителей, не отнесенных к населению, в ценовых зонах оптового рынка (к которым относится большая часть территории РФ, кроме дальнего Востока, Калининградской области, частей республики Коми и Архангельской области и изолированных территорий) реализуется по свободным нерегулируемым ценам, которые в зависимости от выбранной потребителем ценовой категории электроснабжения рассчитываются или за каждый месяц, или за каждый час, а так же может включать цену за установленную мощность. Поэтому при эксплуатации систем отопления не населением, а управляющей компанией, или для общественных зданий, анализ необходимо проводить с учетом их условий покупки энергоресурсов.

Тарифы на тепловую энергию устанавливаются для каждой теплоснабжающей организации и поэтому различаются, причем иногда значительно, как между отдельными муниципальными образованиями, так возможно даже внутри крупных муниципальных образований. Например, в Красноярском крае тариф на тепловую энергию для ряда поселений составляет: п. Недокура – 19 441,74 руб./Гкал (16,7 руб./кВт·ч); п. Тагара – 26 835,22 руб./Гкал (23,1 руб./кВт·ч), что вызвано низкой нагрузкой котельных, работающих на дровах, от 6 до 20 % от установленной мощности. При наличии возможности подключения необходимой электрической мощности установка ТНУ является быстроокупаемым мероприятием.

При среднем соотношении стоимости электрической энергии и энергии централизованного

теплоснабжения 1,7...2,2 эффективность использования тепловых насосов зависит от стоимости их установки, которая складывается из следующих статей:

- стоимость ТНУ и монтажа;
- затраты на сооружение геотермальной системы (бурение скважин и монтаж);
- стоимость низкотемпературной системы отопления здания (может не учитываться, если предусмотрены стальные панельные водяные радиаторы).

В связи с ограничениями в Россию прекращены поставки продукции Danfos, Buderus/Bosh, Stiebel Eltron и др., что снизило качество представленных на рынке ТНУ, но вместе с тем и заметно снизило их стоимость (рис. 4).

По данным спецификаций на сооружение геотермальных систем мощностью 4–20 кВт их стоимость так же имеет линейную зависимость и может быть оценена выражением $C_T \approx 60 + 32,4 \cdot W$, тыс. руб., то есть составляет 1,5–2 стоимости ТНУ.

$$C \approx 80 + 13,5 \cdot W \quad c_{уд} \approx 13,5 + 80/W$$

Таким образом, экономическая эффективность работы ТНУ зависит от следующих факторов:

- а) соотношения стоимости различных энергоносителей для заданного региона;
- б) фактического значения потребляемой ТНУ энергии, которая значением COP, зависящим от температурного напора – разницы температур высокопотенциального и низкопотенциального источников, то есть от температуры нагреваемой воды;
- в) капитальными затратами на сооружение системы отопления (и, при необходимости, подключения к тепловым сетям или системе газоснабжения).

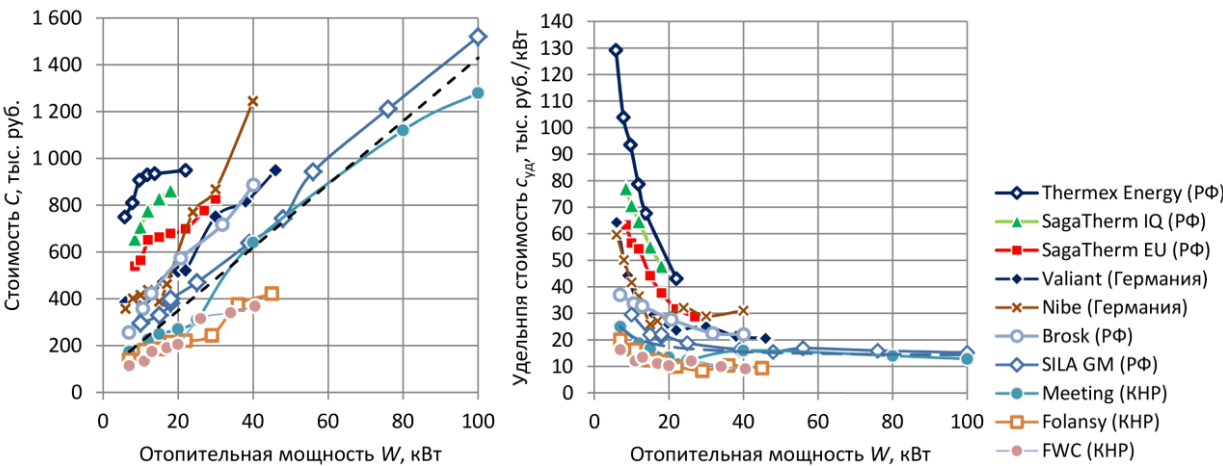
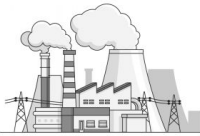


Рис. 4. Стоимость теплонасосных установок
(источники: geoteplo.com; uztn.ru; mircli.ru; solar-dom.com; termonasos.ru; brosk.ru; folansi.ru)

2.4. Потребление первичной (природной) энергии. В европейском стандарте DIN V 18599 «Энергетическая оценка зданий» (и в предшествующему ему DIN V 4701-10) кроме удельного расхода энергоресурсов на единицу площади так же используется показатель «потребление первичной энергии» и

«коэффициент первичной энергии», показывающие количество природной энергии, необходимой для получения объема полезно используемой энергии конечным потребителем. Рассмотрим коэффициенты трансформации энергии, используемых в различных системах отопления (рис. 5).

Ископаемое топливо	Генерация энергоносителя	Передача энергоносителя	Потребитель	Удельный расход первичной энергии
k_T – доля первичного топлива в источнике энергоресурса	k_T – КПД генерации	k_C – КПД сетей	k_n – коэффициент преобразования энергии у потребителей	
Централизованное отопление $k_T = 1$	 $k_T = 0,8...0,9$	 $k_C = 0,76...0,95$	 $k_n = 1$	1,2...1,6
Индивидуальное отопление (топливный котел) $k_T = 1$	—	— *	 $k_n = 0,8...0,92$	1,1...1,25
Отопление электроэнергией $k_T = 0,4...0,97$ (доля топливных электростанций в общей выработке электроэнергии)	 $k_T = 0,32...0,50$ (для ТЭС)	 $k_C = 0,89...0,97$	Электронагревательные приборы, электродоты  $k_n = 1$ Индивидуальная ТНУ  $k_n = COP = 2,5...4$	1,4...3,4 0,4...1,4

* для отдельно стоящих и блочно-модульных котельных тепловыми потерями в наружных сетях пренебрегают

Рис. 5. Потребление первичной энергии в сравниваемых системах отопления
(диапазон возможных значений коэффициентов k_T , приведен по данным табл. 3;
для коэффициентов k_T, k_C диапазон рассчитан по данным статистической отчетности регионов РФ;
диапазоны p_1 и p_2 рассчитаны по приведенным диапазонам коэффициентов)

Первичная энергия проходит следующие трансформации, как правило, связанные с потерями.

1. Преобразование топлива в тепловую электрическую энергию.

Для тепловой энергии, получаемой из топлива, потребление первичной энергии равно потреблению топлива (выраженному в единицах условного топлива). Коэффициент трансформации при генерации теплоты k_T или КПД-нетто котельных является отношением величины отпущенной тепловой энергии к затраченному топливу и другой энергии (с учетом затрат энергии на собственные нужды котельной). Он может быть определен по удельному расходу топлива на тепловую энергию, отпущенную котельными, b_T , кг. усл. топлива/Гкал:

$$k_T \text{ (т.э.)} = 1000 / (7 \cdot b_T). \quad (13)$$

Величина b_T может быть получена для отдельных котельных из утвержденной схемы теплоснабжения поселений и городских округов, для регионов и федеральных округов – из данных государственной статистической отчетности ЕМИСС или данных Отчета о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации, ежегодно публикуемого РЭА Минэнерго России (далее – Отчет).

В случае использования электроэнергии необходимо учитывать, что она может быть получена из разных источников: тепловых электростанций, работающих на природном топливе (ТЭС, так же ТЭЦ, ГРЭС); гидроэлектростанций (ГЭС); атомных электростанций (АЭС); возобновляемых источников энергии – ветроэлектростанций (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС).

Системы электроснабжения развитых территорий представляют собой объединенные региональные или межгосударственные единые электроэнергетические системы (ОЭС), соединяющие источники генерации и потребителей, объединённых общим режимом работы и имеющих общее диспетчерское управление. В составе Единой энергосистемы России включены шесть объединённых ОЭС и одна, изолированная от них (ОЭС Востока). Кроме того, в отдаленных территориях имеются несколько изолированных энергорайонов и зоны децентрализованного энергоснабжения. Структура выработки в разных ОЭС существенно отличается (табл. 3).

Таблица 3

Структура выработки электроэнергии

Объединенные энергосистемы	Доля в выработке	Доли по видам генерации				
		ТЭС	ГЭС	АЭС	ВЭС	СЭС
ЕЭС России¹, в т.ч.	100 %	60 %	19 %	20 %	0,5 %	0,2 %
ОЭС Центра (ЦФО)	22 %	56 %	2 %	42 %	–	–
ОЭС Средней Волги (ПФО)	10 %	51 %	19 %	31 %	0,2 %	0,2 %
ОЭС Урала (УФО)	23 %	97 %	0 %	3 %	0,0003 %	0,2 %
ОЭС Северо-Запада (СЗФО)	10 %	52 %	12 %	36 %	0,01 %	–
ОЭС Юга (ЮФО и СКФО)	10 %	49 %	18 %	28 %	4,3 %	1,1 %
ОЭС Сибири (СФО)	20 %	40 %	60 %	–	–	0,2 %
ОЭС Востока (ДФО)	4 %	59 %	41 %	–	–	–
Европа ²	–	38 % ³	12 %	23 %	18 %	9 %

Примечание:

¹ значения рассчитаны по величине установленной мощности и КУИМ, приведенных в Отчете о функционировании ЕЭС России в 2021 г. (с 2022 г. полные отчеты не публикуются);

² 2023 г., по данным <https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/>;

³ включая иное ископаемое топливо (3,5 %) и биотопливо (5,7 %).

При получении электроэнергии на ТЭС коэффициенты трансформации генерации могут быть установлены только в среднем по ОЭС. Для этого можно использовать удельный расход топлива на производство электроэнергии, b_3 , г усл. топлива/кВт·ч, приводимый в ЕМИСС и Отчете:

$$k_T \text{ (э.э.)} = 123 / b_3. \quad (13)$$

Для всех остальных источников, кроме ТЭС, считается, что поступившая от них электроэнергия является «первичной», поэтому если доля генерации электроэнергии на ТЭС в ОЭС равна k_T , то общий коэффициент трансформации для ОЭС имеет вид:

$$(1 - k_T) + k_T / k_T. \quad (14)$$

2. Потери при передаче энергии (в сетях), так же, как и удельный расход топлива на выработку тепловой и электрической энергии, являются данными статистической отчетности или относятся к информации, подлежащей раскрытию. Данные о потерях в тепловых сетях d_T , %, для отдельных населенных пунктов имеются в схемах теплоснабжения, для регионов и федеральных округов – в системе ЕМИСС и Отчете. Для регионов РФ он составляет от 5% (г. Москва) до 24% (Томская, Костромская, Липецкая обл.). Коэффициент трансформации в тепловых сетях имеет вид:

$$k_c \text{ (т.э.)} = 1 - 0,01d_T. \quad (15)$$

Уровень потерь электрической энергии d_3 , %, публикуемый ПАО Россети и другими сетевыми компаниями составляет от 2,59 % (АО «Россети Тюмень») до 11,27 % (ПАО «Россети Ленэнерго») и в целом по ЕЭС в 2023 г. составил 8,65 %. Коэффициент трансформации в электропередающих сетях составляет

$$k_c (\text{э.э.}) = 1 - 0,01d_3. \quad (16)$$

3. Коэффициент трансформации энергии у потребителей связан как с потерями, так и с преобразованием энергии. Для централизованного теплоснабжения и электроотопления вся поступившая внутрь теплозащитной оболочки энергия используется без потерь и $k_{\Pi} = 1$. Для индивидуального отопления с использованием топливных котлов потери определяются их КПД η_k (80–92 %).

При использовании теплового насоса количество поступившей в здание тепловой энергии $q_{\text{от}}$ больше затраченной электроэнергии e на величину коэффициента трансформации теплового насоса $\text{COP} = q_{\text{от}} / e$, поэтому $k_{\Pi} = \text{COP} > 1$.

Потребление первичной энергии, включающее указанные коэффициенты трансформации, определяется по выражению:

$$p_э = \frac{(1 - k_{\Pi} + k_{\Pi}/k_c)}{k_c \cdot k_{\Pi}}, \quad (17)$$

и характеризует эффективность использования природной энергии для отопления.

Согласно результатам, приведенным на рис. 5, разница в затратах первичной энергии при централизованном и индивидуальном отоплении определяется только потерями в тепловых сетях. Электроотопление самое неэффективное и полу-

чаемая энергия может более чем в 3 раза превысить первичную. При отоплении с использованием ТНУ при благоприятных условиях (большая доля выработки «без углеродной» электроэнергии, высокий КПД ТЭС, низкие потери в электрических сетях) полезно получаемая энергия может быть более чем в два раза меньше затрачиваемой первичной. Но при неблагоприятных условиях затраты первичной энергии сопоставимы с централизованным теплоснабжением.

Можно сделать вывод, что энергетическая (экологическая) эффективность работы теплового насоса по сравнению с другими способами отопления зависит от двух факторов:

а) характеристик и эффективности централизованных систем тепло и электроснабжения;

б) величины коэффициента трансформации теплового насоса COP , что показывает важность правильной оценки этой величины.

3. Исследование эффективности работы ТНУ

3.1. Данные для расчета. Для анализа рассматривался индивидуальный двухэтажный жилой дом нормальной энергетической эффективности с установленной в приказе Минстроя РФ от 17.11.2017 № 1550/пр удельной характеристикой расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию $0,496 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, по которой с учетом минимальной расчетной температуры (табл. 1) была определена отопительная нагрузка. Указанная отопительная нагрузка может быть соотнесена с домами различной энергетической эффективности. Например, для жилых домов с классом «В» указанная мощность для отопления соответствует площади $195 \dots 210 \text{ м}^2$.

Таблица 4

Расчетные параметры

Наименование	Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярск	Сургут	Норильск
Проектная отопительная нагрузка, кВт	7,8	9,8	10,9	12,7	13,8	15,0
Расчетный расход энергии на отопление, кВт·ч/год по климатическим данным (СП 131.13330.2020)	13 530	21 938	27 054	33 343	39 866	55 496
по фактическим климатическим данным (средний за 10 лет)	11 296	19 306	24 420	32 270	36 520	50 207
Минимальная температура грунта на глубине 1,6 м (СП 20.13330.2016), °С	9,1	5,4	3,9	0,2	1,5	-3,1
Принятая температура низкопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ, °С	4,1	0,4	-1,1	-4,8	-3,5	-8,1
Принятые коэффициенты для расчета затрат первичной энергии						
доля затрат природного топлива в структуре электрогенерации k_{Γ}	0,49	0,56	0,56	0,4	0,4	0,4
коэффициенты трансформации генерации k_{Γ}						
тепловой энергии	0,85	0,86	0,81	0,73	0,69	0,73
электроэнергии	0,4	0,47	0,47	0,36	0,36	0,36
коэффициенты трансформации при передаче k_c						
тепловые сети	0,89	0,86	0,88	0,83	0,82	0,83
сети электропередачи	0,9041	0,8938	0,8938	0,9216	0,9216	0,9216

В качестве коэффициентов для расчета затрат первичной энергии использовались статистические данные регионов (тепловая энергия) и ОЭС (электроэнергия).

3.2. Затраты на отопление. Первоначально рассмотрен моновалентный режим работы, в котором тепловой насос полностью обеспечивает отопительную нагрузку.

Для выбора системы отопления для рассматриваемых условий был определен средний COP (за период 10 лет) при работе ТНУ по разным температурным графикам (температурам прямой и обратной воды при наиболее холодной расчетной температуре). Полученные данные (табл. 5)

показывают, что ТНУ может обеспечить любую температуру нагреваемой воды, при снижении температуры вырабатываемой воды COP теплового насоса повышается, но при этом повышается и необходимая площадь отопительных радиаторов (например, для Норильска при температурном графике 50/40 на рассматриваемое здание потребуется установить 10 радиаторов размером 600×1500 мм). Поэтому в качестве компромисса для расчетов выбран температурный график 60/40.

Таблица 5

Коэффициент преобразования энергии (COP) и, при разных температурных графиках системы отопления

Температурный график системы отопления, °C	Фреон	Средний COP за 10 лет (отношение выработанной к затраченной энергии)						Необходимая площадь радиаторов, м ²					
		Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярк	Сургут	Норильск	Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярк	Сургут	Норильск
95/70	R134A	1,88	1,84	1,82	1,65	1,70	1,52	1,39	1,75	1,94	2,26	2,46	2,66
70/50		2,42	2,32	2,27	2,09	2,14	1,94	2,54	3,19	3,56	4,14	4,50	4,86
70/50	R407C	2,18	2,10	2,07	1,91	1,95	1,78	—	—	—	—	—	—
60/40		2,41	2,30	2,26	2,09	2,14	1,95	3,81	4,79	5,34	6,21	6,75	7,30
50/40		2,66	2,52	2,46	2,28	2,33	2,13	4,70	5,91	6,58	7,65	8,32	8,99

В результате расчетов были получены сравнительные затраты на оплату энергоресурсов и первичного топлива для четырех способов отоп-

ления (рис. 6). Теплонасосная установка рассчитывалась на температурный график 60/40°C, используемый фреон – R407A, часто применяемый в ТНУ невысокой мощности.

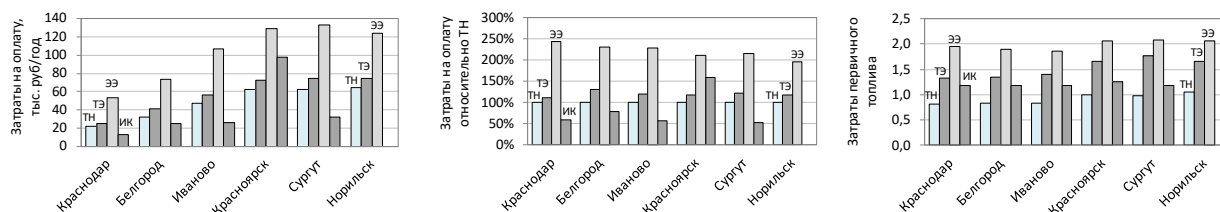


Рис. 6. Затраты на оплату энергоресурсов и затраты первичного топлива для разных видов отопления при фактических погодных данных 2014–2023 г. (в ценах 2024 г.):

ТН – ТНУ с фреоном R407C; ТЭ – централизованное теплоснабжение; ЭЭ – электроотопление; ИК – индивидуальный газовый котел (Краснодар, Белгород, Иваново, Сургут) или угольный котел (Красноярск)

Во всех рассматриваемых случаях затраты на электроэнергию при отоплении ТНУ ниже, чем стоимость тепловой энергии централизованного теплоснабжения. В регионах с более холодным климатом эффективность ТНУ ниже, чем в более теплых, так как большее количество дней с низкой температурой, при которой ТНУ необходимо вырабатывать более горячую воду (см. рис. 3). По сравнению с газовым или твердотопливным отоплением затраты для ТНУ почти в два раза больше, но по экологическим показателям (затратам первичного топлива) тепловой насос заметно лучше других способов отопления.

3.3. Выбор оптимального фреона. На следующем этапе было произведено сравнение затрат на отопление в моновалентном режиме при использовании разных фреонов. Рассматривались фреоны, которые в насыщенном состоянии при температуре –10°C имели давление выше 0,1 МПа (для предотвращения работы под разрежением), и критическая температура которых выше 80°C. В результате для оптимизации использовалось:

- 6 озонорасщепляющих фреонов ($ODP \geq 0,1$);
- 26 фреонов с низким потенциалом разрушения озонового слоя ($0 < OPD < 0,1$);
- 47 озоноразрушающих фреонов ($OPD = 0$).

Дополнительно был произведен расчет затрат для часто используемых фреонов для ТНУ.

Результаты расчета представлены в табл. 6.

Таблица 6

Средние затраты на отопление при фактических погодных данных 2014–2023 г., кВт·ч/год, и отношение затрат к ТНУ с фреоном R407C

Фреон	Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярск	Сургут	Норильск
Фреон, обеспечивающий наименьшие затраты (по группам озонораспада)						
R12 (озонораспадающий)	4 243 (0,88)	7 487 (0,88)	9 667 (0,88)	13 819 (0,89)	15 193 (0,89)	23 037 (0,89)
R142B (переходной)	4 121 (0,85)	7 279 (0,86)	9 400 (0,86)	13 428 (0,86)	14 763 (0,86)	22 371 (0,87)
R510A (озонобезопасный)	4 151 (0,86)	7 325 (0,86)	9 457 (0,86)	13 492 (0,87)	14 840 (0,87)	22 452 (0,87)
Фреоны, применяемые в ТНУ						
R407C	4 832 (1,00)	8 486 (1,00)	10 938 (1,00)	15 564 (1,00)	17 141 (1,00)	25 844 (1,00)
R404A	4 837 (1,00)	8 515 (1,00)	10 994 (1,01)	15 867 (1,02)	17 422 (1,02)	26 672 (1,03)
R410A	4 687 (0,97)	8 231 (0,97)	10 613 (0,97)	15 202 (0,98)	16 722 (0,98)	25 377 (0,98)
R417A	4 800 (0,99)	8 457 (1,00)	10 916 (1,00)	15 653 (1,01)	17 205 (1,00)	26 170 (1,01)
R134A	4 335 (0,90)	7 653 (0,90)	9 883 (0,90)	14 160 (0,91)	15 561 (0,91)	23 655 (0,92)

Применяемые в ТНУ фреоны R407C, R404A, R410A, R417A показали близкие энергозатраты, наиболее экономичным из них является R410A, характеризующийся на 2–3% меньшим потреблением. Фреон R134a более экономичен, на величину до 10 %, но он является агрессивным и ТНУ с его использованием имеют меньший рабочий ресурс.

Наиболее энергоэффективными фреонами во всех регионах оказались одинаковые соединения, что показывает независимость параметров работы ТНУ от климатических условий. Фреоны R510A (разработка МЭИ, смесь R218 и элгаса) и выводимый из использования фреон R142B обеспечивают снижение энергопотребления в ТНУ до 15 %.

Снижение потребления электроэнергии приводит к снижению выбросов парниковых газов. Согласно методике количественного определения объемов выбросов парниковых газов, утв. приказом Минприроды России от 27.05.2022 № 371, выбросы при сжигании энергетических углей составляют 2,7–2,9 т CO₂/т усл. топл., природного газа – 1,59 т CO₂/т усл. топл., что равно соответственно 0,33...0,35 и 0,23 кг CO₂/кВт·ч. С учетом приведенных на рис. 6 затрат первичного топлива на производство электроэнергии можно оценить снижение выбросов CO₂ при полученной экономии электроэнергии (табл. 7).

Таблица 7

Средние затраты на отопление при фактических погодных данных 2014–2023 г., кВт·ч/год, и отношение затрат к ТНУ с фреоном R407C

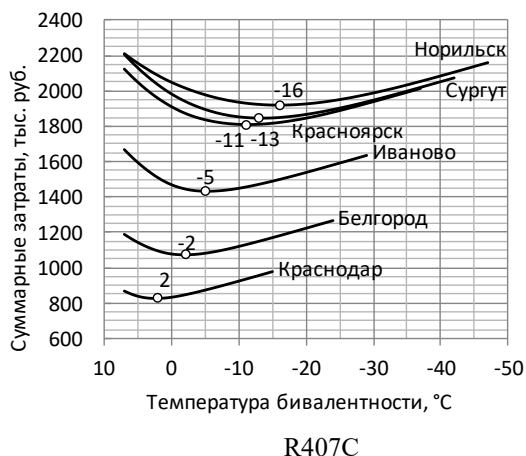
Фреон	GWP-100	Изменение выбросов парниковых газов в CO ₂ -эквиваленте по сравнению с базовым вариантом (R407C), кг/год					
		Краснодар	Белгород	Иваново	Красноярск	Сургут	Норильск
R12	10,02	-142	-246	-312	-516	-570	-890
R142B	2,31	-172	-298	-378	-631	-695	-1 102
R510A	1,24	-165	-286	-364	-613	-673	-1 076
R407C	1,774	0	0	0	0	0	0
R404A	3,922	1	7	14	90	82	263
R410A	2,088	-35	-63	-80	-107	-123	-148
R417A	2,346	-8	-7	-5	26	19	103
R134A	1,12	-120	-206	-259	-415	-462	-694

Потенциал глобального потепления фреонов GWP показывает соотношение значений и для фреона и CO₂. Например, для R410A показатель GWP превышает значение для R407C. Средняя заправка фреоном ТНУ по данным технических паспортов составляет 0,2...0,35 кг/кВт отопительной мощности. Таким образом, для ТНУ рассматриваемой мощности она равна 1,6...5,2 кг и при полной утечке фреонов выбросы составят 2,8...9,2 кг в CO₂-экв для R407C и 3,3...10,9 кг в

CO₂-экв для R410A, то есть разница равна 0,5...1,7 кг. Но более энергоэкономичная работа R410A позволяет в год производить меньше выбросов на величину от 35 кг для Краснодара до 148 кг для Норильска, что показывает несостоятельность оценки парникового эффекта фреонов только от воздействия при их утечках из ТНУ, без учета энергоэффективности работы ТНУ с разными фреонами.

3.4. Стоимость жизненного цикла при разной температуре бивалентности. ТНУ и грунтовые теплообменники имеют высокую стоимость, для ее снижения используют комбинированное отопление, только теплонасосной установкой при высоких температурах воздуха, и с дополнительным подогревом воды электронагревателем при понижении температуры (пиковый догрев). Температура окружающей среды, при которой включается дополнительный электронагреватель (температура бивалентности), определяет максимальную температуру, до которой ТНУ будет нагревать воду. Это позволяет снизить мощность и стоимость ТНУ и повысить COP. Но при этом затраты электроэнергии, по сравнению с отоплением только ТНУ, будут возрастать.

Оптимальная температура бивалентности соответствует минимуму приведенных затрат, учитывающих стоимость сооружения системы



отопления и затраты на ее эксплуатацию, и зависит от экономических факторов (стоимости ТНУ и энергоресурсов) и климатических факторов (длительности периодов с разными температурами воздуха). В работе в качестве критерия приведенных затрат в работе используется стоимость «жизненного цикла», включающая стоимость системы отопления и затраты на отопление в течение 20 лет. Оптимизационный расчет обеспечивал расчет затрат электроэнергии при изменении температуры бивалентности от 8°C (то есть при моновалентном режиме) до $t_{н\ min}$ (когда используется только электроотопление). Дисконтирование денежных потоков при этом не применялось, так как обесценивание денег компенсируется возрастанием стоимости энергоресурсов.

Было произведено два расчета: с фреоном R407C и с поиском озонобезопасного фреона, обеспечивающего при каждой температуре бивалентности наименьшее потребление электроэнергии (рис. 7).

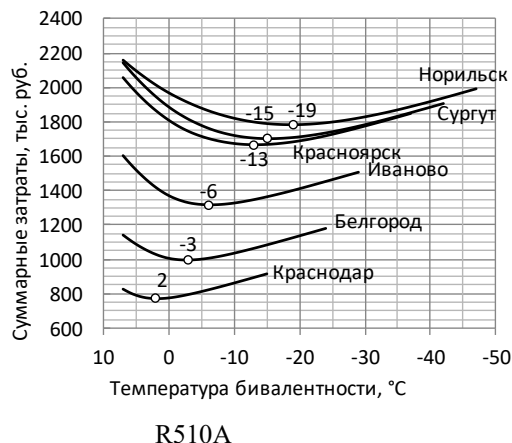


Рис. 7. Стоимость «жизненного цикла»: сооружения ТНУ и затрат на отопление за 20 лет (в ценах 2024 г.)

Так же, как и в моновалентном режиме, для всех регионов и значений температур бивалентности наименьшие энергозатраты обеспечил фреон R510A. Оптимальная температура бивалентности соответствовала примерно середине диапазона $[t_b \dots t_{н\ min}]$. В случае использования энергоэффективного фреона температура бивалентности, обеспечивающая минимальные суммарные затраты, оказалась на несколько градусов ниже.

Выводы. На основании расчета энергопотребления теплового насоса с использованием фактических погодных данных за 10 лет для шести регионов с разным климатом установлено следующее.

1. Технически геотермальные ТНУ (с низкотемпературным теплообменником, размещенным в грунте) могут использоваться для отопления при любом климате, так как их эф-

фективность зависит не от температуры наружного воздуха, а от принятого температурного графика системы отопления.

2. Эффективность ТНУ, осуществляющих качественное регулирование отпускаемой теплоты, зависит от долевого распределения температур воздуха в диапазоне от температуры начала отопления до наиболее низкой температуры. Поэтому в более холодных регионах эффективность тепловых насосов несколько ниже не из-за более низких температур наружного воздуха, а из-за того, что большая доля дней отопительного сезона приходится на температуры, близкие к минимальным для этого региона.

3. Во всех рассматриваемых случаях затраты на электроэнергию при отоплении ТНУ ниже, чем стоимость тепловой энергии централизованного теплоснабжения, но по сравнению с газовым или твердотопливным отоплением – почти в два раза больше. По экологическим показателям

(затратам первичного топлива) тепловой насос заметно лучше других способов отопления.

4. Наиболее энергоэффективными фреонами во всех регионах оказались одинаковые соединения, что показывает независимость параметров работы ТНУ от климатических условий как в моновалентном режиме, так и в бивалентном.

5. Показана несостоятельность оценки парникового эффекта фреонов, учитывающая только воздействие от их утечек, так как изменение парниковых выбросов при выборе более энергоэффективного фреона приводит к изменению выбросов почти в 100 раз больше, чем изменение выбросов, связанных с потенциалом глобального потепления фреонов GWP.

6. Можно заключить, что климатические условия не являются препятствиями и ограничениями при использовании тепловых насосов, но необходимо проектирование ТНУ с их учетом, так как технико-экономическое обоснование на основе паспортных характеристик ТНУ не отражает его реальные режимы работы и эффективность.

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. Дзюба А.П., Конопелько Д.В. Обзор мировых и отечественных научных исследований в области использования электрических систем централизованного теплоснабжения // Вестник московского финансово-юридического университета МФЮА. 2024. № 2. С. 191–203. DOI: 10.52210/2224669X_2024_3_191.
2. Wijesuriya S., Kishore R.A., Bianchi M.V.A., Booten C. Energy impact of heating electrification in midrise multifamily buildings in mixed-humid climates // Cell Reports Sustainability. 2024. Vol. 1(9). 100181. DOI: 10.1016/j.crsus.2024.100181.
3. Lu Z., Ziviani D. Operating cost comparison of state-of-the-art heat pumps in residential buildings across the United States // Energy and Buildings. 2022. Vol. 277. 112553. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112553.
4. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review // Geothermics. 2021. Vol. 90. Ст. 101915. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101915.
5. Серегина Е.А., Бейманов Т. Использование тепловых насосов для обогрева помещений в условиях России // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2019. № 2 (15). С. 16–21. EDN: XBEDFV.
6. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Орлов П.А., Уваров В.А. Тепловые насосы с испарителями различных конструкций // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 5. С. 6. EDN: SRCVAS.
7. Gaur A.S., Fitiwi D.Z., Curtis J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review // Energy Research & Social Science. 2021. Vol. 71. Ст. 101764. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101764.
8. Adebayo P., Jathunge C.B., Darbandi A., Fry N., Shor R., Mohamad A., Wemhöner C., Mwesigye A. Development, modeling, and optimization of ground source heat pump systems for cold climates: A comprehensive review // Energy and Buildings. 2024. Vol. 320. 114646. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114646.
9. Moghanni R., Hakkaki-Fard A., Hannani S.K. A comprehensive study on the performance of vertical ground-coupled heat pumps // Geothermics. 2023. Vol. 110. 102674. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102674.
10. Brown C., Hampton S., Fawcett T. Accelerating renewable heat: Overcoming barriers to shared-loop ground source heat pump systems in the United Kingdom // Energy Research & Social Science. 2024. Vol. 115. 103644. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103644.
11. Петин Ю.М. Термодинамические аспекты использования тепловых насосов в климатических условиях России // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 7(63). С. 48–58. EDN: JXO-AMV.
12. Васильев Г.П., Горнов В.Ф., Дмитриев А.Н., Колесова М.В., Юрченко В.А. Геотермальное теплоснабжение в московском регионе: температурный потенциал и рациональная глубина термоскважин // Теплоэнергетика. 2018. № 1. С. 85–92. DOI: 10.1134/S0040363618010095.
13. Reina J.C., Toleikyte A., Volt J., Carlsson J. Alternatives for upgrading from high-temperature to low-temperature heating systems in existing buildings: Challenges and opportunities // Energy and Buildings. 2024. Vol. 323. 114798. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114798.
14. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. М.: Граница, 2006. 176 с. EDN: QNMCSN.
15. Васильев Г.П., Песков Н.В., Горнов В.Ф., Колесова М.В. Эффективность использования низкопотенциального геотермального тепла в климатических условиях территории России //

Известия Академии Наук. Энергетика. 2015. № 3. С. 30–38. EDN: UAGYMH.

16. Vasilyev G.P., Gornov V.F., Dmitriev A.N., Kolesova M.V. The Influence of the Ground Thermal Energy and Borehole Heat Exchangers Depth on the Efficiency of Heat Pump (GHSP) Systems in Moscow Geo-climatic Conditions // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2020. Vol. 9(4). Pp. 570–575. DOI: 10.18178/ijmerr.9.4.570-575.

17. Гулый С.А., Трушевский С.Н. Анализ эффективности применения вертикальных теплообменников тепловых насосов в районах вечной мерзлоты // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 17 (157). С. 24–32. EDN: SPGTZV.

18. Ермоленко М.В., Тоимбаев А.Б., Нургалиев Д.Н. Эффективность теплоснабжения посредством использования тепловых насосов // Механика и технологии. 2016. № 1 (51). С. 115–126. EDN: WBEOGH.

19. Богословский В.Н., Сканави Л.Н. Отопление. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.

20. Трубаев П.А., Гришко Б.М. Тепловые насосы: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 143 с.

21. Igoumnov S., Plachinda S., Barkovskaya T., Kornilov V. Chladone problem in Russia: ways and methods of solution // Fluorine Notes. 2002. Vol. 1(20). Pp. 3–4. URL: http://www.notes.fluorine1.ru/public/2002/1_2002/article_2.html.

22. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Черников А.А. Долговременные изменения содержания озона в тропосфере // Известия российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 1. С. 66–77. EDN: HRZBMH.

23. Mota-Babiloni A., Barbosa J.R. Jr., Mahnatch P., Lozano J.A. Assessment of the utilization of equivalent warming impact metrics in refrigeration, air conditioning and heat pump systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 129. 109929. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109929.

24. Yang Z., Feng B., Ma H., Zhang L., Duan C., Liu B., Zhang Y., Chen S., Yang Z. Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants // International Journal of Refrigeration. 2021. Vol. 126. Pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.01.022.

25. Maeng H., Kim J., Kwon S., Kim Y. Energy and environmental performance of vapor injection heat pumps using R134a, R152a, and R1234yf under various injection conditions // Energy. 2023. Vol. 280. 128265. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128265.

26. Mazer M.F.P., da Rosa O.C., da Silva A.K. Performance assessment of residential heat pumps operating in extreme cold climates using zeotropic mixtures // International Journal of Refrigeration. 2024. Vol. 168. Pp. 220–229. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.08.018.

27. Park C., Lee H., Hwang Y., Radermacher R. Recent advances in vapor compression cycle technologies // International Journal of Refrigeration. 2015. Vol. 60. Pp. 118–134. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.08.005.

28. Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б., Манюк А.И., Ильин В.К. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник. Изд. 5, стереотип. М.: Ленанд, 2023. 432 с.

29. Трубаев П.А. Анализ и повышение энергоэффективности при проектировании и эксплуатации зданий и систем теплоснабжения. Белгород: Изд-во БГТУ, 2024. 311 с. URL: <https://et.bstu.ru/teachers/books>.

Информация об авторах

Трубаев Павел Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологии. E-mail: trubaev@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кошлич Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: koshlich@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Белуосов Александр Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой электроэнергетики и автоматики. E-mail: ntk@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Буханов Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: dgbukh@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гребеник Артём Григорьевич, старший преподаватель кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: iitusnik@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Прасол Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматизации. E-mail: dapras@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.12.2024 г.

© Трубаев П.А., Кошлич Ю.А., Белоусов А.В., Буханов Д.Г., Гребеник А.Г., Прасол Д.А., 2025

***Trubaev P.A., Koshlich Yu.A., Belousov A.V., Bukhanov D.G., Grebenik A.G., Prasol D.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
E-mail: trubaev@mail.ru

RESEARCH OF GEOTHERMAL HEAT PUMP UNIT EFFICIENCY IN CLIMATIC CONDITIONS OF RUSSIAN REGIONS

Abstract. Currently, there is an opinion that heating with heat pumps is effective only in regions with warm climate. In this paper we have evaluated the performance of heat pump units (HPU) for six typical Russian regions with GWP from 2526 to 10360. Since the energy consumption in the heat pump cycle depends on the temperature difference between the cold and hot coolant, the actual average daily outdoor air temperature for 2014-2023 was used for calculation. A methodology of thermodynamic calculation of the heat pump cycle and determination of energy consumption at different outdoor air temperature in monovalent and bivalent modes was proposed. Three indicators were used to evaluate the efficiency: average annual energy consumption in actual climatic conditions; life cycle cost of the project, which includes the sum of costs of construction of the heat pumping unit with a ground heat exchanger and electricity consumption during operation; primary fuel costs, which it is proposed to calculate using the indicators of energy systems of the regions. It is concluded that thermal heat exchangers can be used for heating in any climate, as their efficiency depends not on the outside air temperature, but on the adopted temperature schedule of the heating system. In colder regions, the efficiency of heat pumps is somewhat lower not because of lower temperatures, but because a large proportion of the days of the heating season are at temperatures close to the minimum for that region. In all regions, taking into account the cost of energy carriers in those regions, the energy costs of heat pump heating are lower than the cost of district heating, but almost twice as high compared to gas or solid fuel heating. When comparing costs when using 79 different freons, the most energy efficient compounds in all regions turned out to be the same, which confirms the independence of TNU operation parameters from climatic conditions.

Keywords: heat pump, heating, temperature schedule, quality control, coefficient of transformation, COP

REFERENCES

1. Dziuba A.P., Konopelko D.V. Overview of world and domestic scientific research in the field of the use of electric district heating systems [Obzor mirovy'x i otechestvenny'x nauchny'x issledovaniy v oblasti ispol'zovaniya elektricheskix sistem centralizovannogo teplosnabzheniya]. Bulletin of the Moscow Finance and Law University MFUA [Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta MFUA]. 2024. Vol. 3. Pp. 191–203. DOI: 10.52210/2224669X_2024_3_191. (rus)
2. Wijesuriya S., Kishore R.A., Bianchi M.V.A., Booten C. Energy impact of heating electrification in midrise multifamily buildings in mixed-humid climates. Cell Reports Sustainability. 2024. Vol. 1(9). Article 100181. DOI: 10.1016/j.crsus.2024.100181.
3. Lu Z., Ziviani D. Operating cost comparison of state-of-the-art heat pumps in residential buildings across the United States. Energy and Buildings. 2022. Vol. 277. Article 112553. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112553.
4. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. Geothermics. 2021. Vol. 90. Article 101915. DOI: 10.1016/j.geothermics.2020.101915.
5. Seregina E.A., Beimanov T. Use of heat pumps for space heating in Russian conditions [Ispol'zovanie teplovy'x nasosov dlya obogreva pomeshhenij v usloviyax Rossii]. Urban planning. Infrastructure. Communications [Gradostroitel'stvo. Infrastruktura. Kommunikacii]. 2019. No. 2 (15). Pp. 16–21. (rus)
6. Ilina T.N., Savvin N.Iu., Orlov P.A., Uvarov V.A. Heat pumps with evaporators of various designs [Teplovy'e nasosy s isparitelyami razlichny'x konstrukcij]. Bulletin of Eurasian Science [Vestnik evrazijskoj nauki]. 2023. Vol. 15. No. 5. Article 6. (rus)
7. Gaur A.S., Fitiwi D.Z., Curtis J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. Energy Research & Social Science. 2021. Vol. 71. Article 101764. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101764.
8. Adebayo P., Jathunge C.B., Darbandi A., Fry N., Shor R., Mohamad A., Wemhöner C.,

Mwesigye A. Development, modeling, and optimization of ground source heat pump systems for cold climates: A comprehensive review. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 320. Article 114646. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114646.

9. Moghanni R., Hakkaki-Fard A., Hannani S.K. A comprehensive study on the performance of vertical ground-coupled heat pumps. *Geothermics*. 2023. Vol. 110. Article 102674. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102674.

10. Brown C., Hampton S., Fawcett T. Accelerating renewable heat: Overcoming barriers to shared-loop ground source heat pump systems in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*. 2024. Vol. 115. Article 103644. DOI: 10.1016/j.erss.2024.103644.

11. Petin Iu.M. Thermodynamic aspects of heat pump application under the climatic conditions of Russia [Termodinamicheskie aspekty' ispol'zovaniya teplovy'x nasosov v klimaticheskix usloviyax Rossii]. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2008. No. 7(63). Pp. 48–58. (rus)

12. Vasilev G.P., Gornov V.F., Dmitriev A.N., Kolesova M.V., Iurchenko V.A. Ground source heat supply in Moscow oblast: Temperature potential and sustainable depth of heat wells. *Thermal engineering*. 2018. Vol. 65, No. 1. Pp. 72–78. DOI: 10.1134/S0040601518010093.

13. Reina J.C. R., Toleikyte A., Volt J., Carlsson J. Alternatives for upgrading from high-temperature to low-temperature heating systems in existing buildings: Challenges and opportunities. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 323. Article 114798. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114798.

14. Vasilev G.P. Heat and cooling supply of buildings and structures using low-potential heat energy of the Earth's surface layers [Teploxladosnabzhenie zdaniy i sooruzhenij s ispol'zovaniem nizkopotencial'noj teplovoj e'nergii poverxnostny'x sloev Zemli]. Moscow: Granicza, 2006. 176 p. (rus)

15. Vasilev G.P., Peskov N.V., Gornov V.F., Kolesova M.V. Efficiency low-potential heat in climatic conditions in Russia [E'ffektivnost' ispol'zovaniya nizkopotencial'nogo geotermal'nogo tepla v klimaticheskix usloviyax territorii Rossii]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power engineering*. 2015. No. 3. P. 30–38. (rus)

16. Vasilyev G.P., Gornov V.F., Dmitriev A.N., Kolesova M.V. The Influence of the Ground Thermal Energy and Borehole Heat Exchangers Depth on the Efficiency of Heat Pump (GHSP) Systems in Moscow Geo-climatic Conditions. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2020. Vol. 9(4). Pp. 570–575. DOI: 10.18178/ijmerr.9.4.570-575. (rus)

17. Gulyi S.A., Trushevskii S.N. Analysis of the effectiveness of vertical heat exchangers of heat pumps in permafrost region [Analiz e'ffektivnosti primeneniya vertikal'ny'x teploobmennikov teplovy'x nasosov v rajonax vечноj merzloty']. *International scientific journal for alternative energy and ecology*. 2014. Vol (157). Pp. 24–32.

18. Ermolenko M.V., Toimbaev A.B., Nurgaliev D.N. Efficiency of heat supply by using heat pumps [E'ffektivnost' teplosnabzheniya posredstvom ispol'zovaniya teplovy'x nasosov]. *Mechanics & Technologies*. 2016. No. 1 (51). Pp. 115–126. (rus)

19. Bogoslovskii V.N., Skanavi L.N. Heating [Otoplenie]. Moscow: Strojizdat, 1991. 735 p. (rus)

20. Trubaev P.A., Grishko B.M. Heat pumps: textbook [Teplovy'e nasosy': uchebnoe posobie]. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2010. 143 p. (rus)

21. Igoumnov S., Plachinda S., Barkovskaya T., Kornilov V. Chladone problem in Russia: ways and methods of solution. *Fluorine Notes*. 2002. Vol. 1(20). Pp. 3–4.

22. Zvyagintsev A.M., Kruchenitskii G.M., Chernikov A.A. Long-term variations in tropospheric ozone content. *Izvestiya, atmospheric and oceanic physics*. 2005. Vol. 41 (1). Pp. 56–66.

23. Mota-Babiloni A., Barbosa J.R. Jr., Maikhatch P., Lozano J.A. Assessment of the utilization of equivalent warming impact metrics in refrigeration, air conditioning and heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 129. Article 109929. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109929.

24. Yang Z., Feng B., Ma H., Zhang L., Duan C., Liu B., Zhang Y., Chen S., Yang Z. Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants. *International Journal of Refrigeration*. 2021. Vol. 126. Pp. 12–22. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.01.022.

25. Maeng H., Kim J., Kwon S., Kim Y. Energy and environmental performance of vapor injection heat pumps using R134a, R152a, and R1234yf under various injection conditions. *Energy*. 2023. Vol. 280. Article 128265. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128265.

26. Mazer M.F.P., da Rosa O.C., da Silva A.K. Performance assessment of residential heat pumps operating in extreme cold climates using zeotropic mixtures. *International Journal of Refrigeration*. 2024. Vol. 168. P. 220–229. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.08.018.

27. Park C., Lee H., Hwang Y., Radermacher R. Recent advances in vapor compression cycle technologies. *International Journal of Refrigeration*. 2015. Vol. 60. Pp. 118–134. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.08.005.

28. Maniuk V.I., Kaplinskii Ia.I., Khizh E.B., Maniuk A.I., Ilin V.K. Adjustment and operation of water heating networks: Handbook [Naladka i e'kspluatatsiya vodyany'x teplovy'x setej: Spravochnik]. Ed. 5, stereotyped. Moscow: Lenand, 2023. 432 p. (rus)

29. Trubaev P.A. Analysing and improving energy efficiency in the design and operation of buildings and heat supply systems [Analiz i povy'shenie e'nergoe'ffektivnosti pri proektirovanii i e'kspluatatsii zdaniy i sistem teplosnabzheniya]. Belgorod: Publishing House of BSTU named after V.G. Shukhov, 2024. 311 p. (rus)

Information about the authors

Trubaev, Pavel A. DSc, Professor. E-mail: trubaev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Koshlich, Yuri A. PhD, Assistant professor. E-mail: koshlich@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Belousov, Aleksandr V. PhD, Assistant professor. E-mail: ntk@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bukhanov, Dmitry G. PhD, Senior lecturer. E-mail: dgbukh@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Grebenik, Artem G. Senior lecturer. E-mail: iitusnik@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Prasol, Dmitrii A. PhD, Assistant professor. E-mail: dapras@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 01.12.2024

Для цитирования:

Трубаев П.А., Кошлич Ю.А., Белоусов А.В., Буханов Д.Г., Гребеник А.Г., Прасол Д.А. Исследование эффективности использования геотермальной теплонасосной установки в климатических условиях российских регионов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 49–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-49-67

For citation:

Trubaev P.A., Koshlich Yu.A., Belousov A.V., Bukhanov D.G., Grebenik A.G., Prasol D.A. Research of geothermal heat pump unit efficiency in climatic conditions of Russian regions. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 49–67. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-49-67

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-68-81

Fonseka E.A.G., Romanov O.S.Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.***E-mail: eagaavithrif@gmail.com*

FLORISM: FUSING BIOMIMETIC ARCHITECTURE WITH DIVERSE FLOWER STRUCTURES

Abstract. *Biomimetics in architecture specifically inspired by the structural features of various natural entities from the biosphere helps create a methodological framework for adopting and converting biological strategies into design innovations. Accordingly, the paper introduces under the newly coined term "florism" a novel concept that addresses a sustainability-oriented design principle evolved in the spirit of incorporating various parts of flowers in architectural designs with an aesthetic and constructional perception of their structural and functional qualities. In this concern, examples are drawn from several of the existing architectural designs inspired by the forms and functions of flowers, in justifying the application solutions that can be worked out to ensure the functionality and sustainability of buildings designed under florism. Further, the paper concentrates on innovations in the construction industry under florism that can enhance the aesthetic and functional efficiency of architectural designs in general.*

Keywords: *florism, biomimetic architecture, sustainable design, energy effective, biomimetic principles, architecture and flowers*

Introduction. In many cities in the world, urban development has evolved into a process of nurturing concrete jungles with rigid monotonous-looking forms which appear to be eyesores [1]. The constructions that have emerged in this context pose detrimental effects on the existing thermal balance which directly impact the average air temperature of the urban areas and have long-lasting negative effects [1]. In this concern, biomimetics, an approach that draws inspiration from time-honoured natural designs, provides a promising framework for sustainable architectural practices adopting innovative constructional solutions that harmonize with nature, prevent challenges of environmental deterioration, and resolve the need for sustainable development [2, 3]. Taking a step further, the author endeavours in the paper to promote the adoption of the structural features of flowers in designing buildings to prevent monotony in urban environments. Accordingly, the author introduces the new term *florism*, coined from the combination of "flora" (flower) and "ism" (a distinctive doctrine, cause, or theory) in Latin (Mariam-Webster) to "define a rationale for the integration of biomimetic principles into architectural designs inspired by the elegance, efficiency, and sustainability of various structural features of flowers carefully studied under floral morphology" (Weber et al, 2019). The pursuit of sustainable architecture has led to the exploration of biomimetic design principles, drawing inspiration from the amazing efficiency and sustainability of nature [2, 4, 5]. In this context, "*florism*" represents the integration of biomimetic principles into architectural buildings specifically inspired by the structural appearance and organ functionality of flowers. By combining sustainable practices and floral aesthetics, *florism* aims to create environmentally conscious and visually appealing structures. Using

the structural principles observed in flowers, architects can discover innovative strategies for designing buildings that optimize their energy use, enhance their durability, promote their natural ventilation, and improve their overall environmental performance.

Object of Scientific Research. The object of this research is to explore avenues of incorporating biomimetic architectural principles inspired by floral morphology, specifically under the concept of *florism*, in architectural constructions to advance sustainable urban design. By studying and interpreting the structural and functional attributes of flowers, this research aims to define new paradigms in architectural aesthetics and functionality. Here, *florism* is proposed not only as a design philosophy but also as a comprehensive approach to improving environmental efficiency and visual appeal in urban structures.

Objectives of Scientific Research. The objectives of this research include:

1. Identifying and analyzing specific floral structures, such as the receptacle, sepals, petals, stamens, and pistils, whose forms can be practically incorporated in architectural design.
2. Developing design strategies under *florism* to enhance energy efficiency, durability, and functionality in urban buildings.
3. Demonstrating the ways *florism*-inspired structures can mitigate urban environmental issues, such as heat island effects and poor ventilation, and fostering a close connection to natural aesthetics in sophisticated urban settings.

Research Methods. The study employs a combination of qualitative and analytical research methods, encompassing both a literature review and a case study analysis. The following methods were adopted to achieve the research objectives:

1. **Literature Review:** A comprehensive examination of prior works on biomimetic principles and sustainable architectural design was conducted, drawing from academic journals, architectural case studies, and technical literature on floral morphology.

2. **Case Study Analysis:** Selected architectural projects inspired by natural floral forms, including the Lotus Temple in New Delhi and the Gherkin in London, were analyzed to assess how floral structures have been adapted for achieving functionality and aesthetics in real-world applications.

3. **Comparative Analysis:** This involved a comparative study between traditional and *florism*-based architectural designs to identify the key areas of improvement in terms of energy efficiency, aesthetic appeal, and environmental adaptability.

These methods allow an in-depth understanding of the application of *florism* in architecture, demonstrating the constructional feasibility and environmental benefits of adopting floral biomimicry within urban development endeavours.

Adoption of Structural Features of Flowers in Architecture

Flowers have long captivated human imagination with their delicate shapes, vibrant colours, and sweet fragrances. *Florism* seeks to capture and embody these qualities in building designs. In such a process, architectural designs can incorporate elements such as curved shapes, organic forms, and intricate details inspired by flowers to create visually stunning and harmonious structures. By closely studying the morphology and organ functionalities of flowers (fig. 1), it is understood that *florism-based* design principles can be defined and incorporated into the construction industry.

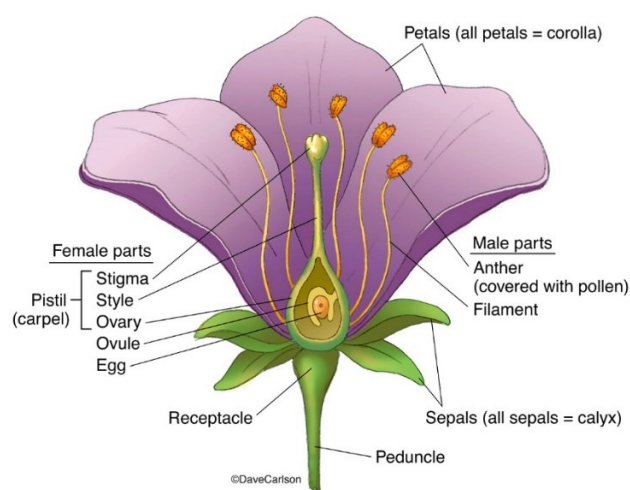


Fig. 1. Morphology of a flower. ©DaveCarlson
(image source -<https://www.toppr.com/ask/question/which-is-the-sequence-of-four-whorls-of-flower-from-outside-to-inside/>)

Each flower essentially consists of a floral axis bearing the stamens, pistils, and accessory organs (typically sepals and petals) [6]. The flower parts are usually arrayed in whorls or arranged spirally [6]. These whorls are usually made of four separate parts: (1) an outer calyx made up of sepals; (2) a corolla made up of petals; (3) an androecium, or group of stamens; and (4) a gynoecium made up of pistils [6]. The receptacle of a flower is the base of the flower to which all the above parts are attached [6, 7, 8]. All these structural features of flowers can be used as models in developing different parts of buildings to resolve various types of environmental and functional issues [9, 10, 11].

Receptacle to Ensure Structural Integrity and Stability

Typically, the receptacle tends to be the part that supports and holds the flower together which usually helps to withstand certain harsh weather conditions [7, 8]. Accordingly, while adopting the structural features of flowers in architecture, one may find several ways to draw inspiration from the receptacle under *florism*.

1) Gathering space: A flower's receptacle acts as a focal point for the reproductive structures [7]. This concept can be translated into architectural designs by creating a central gathering space within a building, such as a courtyard, atrium, or communal area. These spaces can serve to stimulate social interactions, collaboration, and a sense of community.

2) Structural integration: The receptacle provides support and attachment for the floral organs [7, 8]. Under *florism* architects can integrate structural elements to provide support and stability. For example, columns or pillars in a building can visually represent the idea of the receptacle by providing a solid foundation and structural integrity to the overall design.

3) Functional Integration: The receptacle in a flower is responsible for providing nourishment for the developing seeds [7]. This concept can be transferred into architectural design by including practical and functional aspects that support the well-being of the building occupants. Incorporating features such as green spaces, living walls, or indoor gardens can indicate the receptacle's function of nurturing and giving a healthy living environment.

In this context, the Lotus Temple in New Delhi (Fig. 2), also known as the Bahá'í House of Worship, whose structure is inspired by the lotus flower [12] can be taken as a vital example. There each petal of the enormous lotus bloom serves as an entrance to the central prayer hall, which can accommodate several thousand visitors at a time. Thus, it not only showcases the aesthetic beauty of the flower but also utilizes sustainable design principles of receiving natural ventilation, controlling internal temperature,

optimising daylight attraction, and reducing electricity consumption usually needed to operate artificial lighting and cooling systems. The building utilizes natural ventilation through openings in the upper and lower parts of the structure [12].



Fig. 1. The Lotus Temple

(image source- <https://www.delhicapital.com/delhi-locations/lotus-temple-2/>)

Sepals to Provide Reinforcement for Protective Cover

The protective outer layer of flowers known as the sepals surrounds the reproductive organs of the flower and their primary role is to protect the developing flower bud [6, 7]. Similarly, architects can use durable materials with thermal insulation properties such as double-skin façade technologies, double-glazed glass, or insulated panels to create a protective barrier against heat loss or gain and provide reinforcement to the building. This enhances building energy efficiency and reduces dependency on mechanical heating and cooling systems. Double skin façades consist of two glass layers with a gap between them creating an air cavity. The air cavity is either sealed to retain heat in winter or ventilated for surplus heat in the summer. Solar shading devices, such as Venetian blinds, are frequently employed in the space between the two skins to enhance the double skin façade's performance [13].

The Gherkin, the London (Fig. 3.) office tower designed by Foster + Partners is a prominent example of implementing a double skin façade [14]. The clear glass that surrounds the double skin façade zones presumes that air between the curtain wall layers will absorb solar heat, rise as a result of the stack effect, and vent to the external through small openings at the top of each two-story structural bay. The two and six-story atria are designed to draw fresh air through the structure by exploiting the pressure differences outside. This design emphasizes the mixed-mode ventilation which allows the building to be cooled mechanically and naturally [14].

Petals are often the most visually striking and vibrant part of a flower. Petals often have vivid colours to attract specific pollinators [15]. Under *florism*, there are endless possibilities to infuse the

beauty and aesthetics of petals in architectural designs as well as attract visitors which will help the economic growth of the cities.



Fig. 2. 30 St. Mary Axe

(The Gherkin) (image source- <https://london-topia.net/site-news/featured/30-st-mary-axe-10-interesting-facts-figures-gherkin/>)

Petals in Modelling the Attractive Walls

1) Form and shape: Petals exhibit a wide range of shapes, configurations and sizes and consist of intricate patterns [15]. These features can pave the way to create curved architectural elements, such as curved walls, roofs, or façades, mimicking the sculptural beauty of petals, creating organic and flowing shapes, adding an artistic touch, and evoking the impression of being surrounded by nature's splendour.

2) Colour and visual impact: Petals are known for their vibrant colours [15, 16]. *Florism* can explore colourful materials or employ innovative techniques such as using coloured glass or artistic lighting design to mimic the vivid hues found in petals.

3) Texture and Materiality: Petals have a variety of textures, including softness, velvety smoothness, and delicate patterning [15, 16]. Textural features can be used in architectural design to create sensory richness and tactile experiences. Architects can experiment with textures that mimic the texture of petals, such as textured wall coverings and fabric panels.

4) Light and Translucency: Petals often possess a translucent quality, allowing light to pass through them [16]. By incorporating light-filtering elements such as designing spaces with large windows or glass walls to allow ample natural light to illuminate the interior spaces, mimicking the way petals capture and interact with sunlight.

"The Lotus Building and People's Park" in Wujin, China designed by Studio505 (Fig. 4.) stands as an inhabited sculpture [16]. Visitors enter from below into a cathedral dome-like interior space that creates a vibrant and cheerful ambience [17]. This is largely due to the colour gradient of the petal ribs which begins as a deep hue only at the structure's edge and fades into lighter and airier tones within [17]. 'The lotus building' is further enhanced at night, illuminated by a lighting system [17].

Another example of the optimal use of lighting can be drawn from the ArtScience Museum in Singapore (Fig. 5.), designed by Moshe Safdie, which also draws inspiration from the lotus flower, specifically its petals that gently open and embrace the sky [18]. The museum's unique shape includes ten finger-like structures, resembling lotus petals, extending from a central base [18]. These "petals" house the exhibition

galleries, creating a harmonious and immersive space for visitors. The design allows natural light to penetrate the galleries, reducing reliance on artificial lighting [18]. Rainwater is collected in the dish-shaped roof of the museum, which drains through an oculus, creating a cascade that feeds an internal pond [18]. The collected water is then filtered and purified for use inside the building [18].



Fig. 4. The Lotus Building and People's Park © John Gollings
(image source- <https://www.archdaily.com/521699/the-lotus-building-and-people-s-park-studio505/53ae3d38c07a80eb1c0000a5-the-lotus-building-and-people-s-park-studio505-photo>)



Fig.5. ArtScience Museum, Singapore © SafdieArchitects
(image source- <https://www.archdaily.com/119076/artscience-museum-in-singapore-safdie-architects/5013b1f928ba0d39630009f4-artscience-museum-in-singapore-safdie-architects-photo>)

The Stamen in Modelling the Top (Stamen as functional and Aesthetic elements)

Stamen is the male reproductive part of a flower, consisting of the filament and the anther [6, 7]. Stamen offers many opportunities to integrate functional and aesthetic elements under *florism*.

1) Structural features: The stamen in a flower is usually a slender and an elongated structure [6, 7].

2) Lighting Effects: The anther, which is located at the apex of the stamen, contains pollen for the production of reproductive cells [6, 7]. Lighting can be

used in architectural design to simulate the aesthetic effect of pollen dispersal.

The 7m tall chandelier in The Lotus Building and People's Park in Wujin, China (Fig. 6.) is a significant example of a structure that combines sophisticated geometry with simple details, structural efficiency, and dynamically perceived sculptural and lit form [17].



Fig. 6. The 7m tall chandelier in The Lotus Building and People's Park in Wujin, China (image source- https://www.archdaily.com/521699/the-lotus-building-and-people-s-park-studio505/53ae3f9ec07a806b4b00008a-the-lotus-building-and-people-s-park-studio505-photo?next_project=no)

Pistil as a Sustainable and Alternative Energy Source

The pistil is the female reproductive part of a flower which consists of the stigma, style, and ovary [6]. This structure allows architects to incorporate attractive but functional elements in *florism-oriented* designs.

1) Central element: the pistil is usually located in the centre of a flower which can inspire architects to design a central focal point in such a way that an imaginary pistil appears conceptually. This central point can serve as a visual anchor.

2) Sustainability and Regeneration: The pistil is essential for fertilization and seed formation in flowers [6]. The concept of the pistil can be associated with sustainability and regeneration in *florism*. Adopting the formation of the pistil, renewable energy technologies, such as solar panels or wind turbines, can be integrated into a building in an elongated vertical structure.

3) Natural Light and Ventilation: In nature the pistil facilitates pollination by allowing the stigma to open [6]. This characteristic can be expressed in architectural design by means of natural light and ventilation systems.

The Wuhan Energy Flower (Fig. 7.), designed by architect Mikhail Dikov, is an innovative energy-generating structure located in Wuhan. It is notable that it showcases the integration of pistil-inspired design principles. Its design combines multiple sustainable energy production technologies. Thousands of solar panels are used as decorations for the building's exterior [19]. Rainwater is also gathered by a flower-like canopy, stored, and used for irrigation and other non-potable purposes [19]. Wind turbines are built into the pistil sticking out of the flower [19]. Integrating solar and wind energy into a single structure allows the Wuhan Energy Flower to use both renewable energy sources simultaneously, optimizing energy production [19].



Fig. 7. Energy Flower-Institute of New Energy, Wuhan (image source- <http://www.inew.cn/index.php?c=article&a=type&tid=47>)

Adoption of Behavioural Patterns of Flowers in Architecture

Beyond the structural beauty and morphology of flowers, their behavioral adaptations offer a unique layer of inspiration for architectural design. Flowers exhibit a wide range of responsive actions, often driven by environmental conditions such as light, temperature, and humidity [20]. These behaviors, evolved over millennia, allow flowers to optimize their growth, energy use, and survival in diverse ecosystems [21]. Translating these adaptive traits into architectural elements introduces a new dimension to building designs, where structures can not only emulate natural aesthetics but also embody the resilience and adaptability to nature [22].

Incorporating floral behaviors into architecture aligns with biomimetic principles that aim to create buildings that react organically to their surroundings [23]. Such responsive systems in architecture can enhance sustainability, comfort, and functionality by shifting how buildings interact with natural forces. For example, by adapting heliotropic movement as seen in sunflowers, architects can create facades that follow the sun's path, optimizing natural light and thermal control throughout the day [24]. This design solution not only reduces reliance on artificial lighting and heating systems but also creates a dynamic interaction between the building and its environment, capturing the essence of natural growth and adaptation [21].

Behavioral integration in architecture also serves as a practical response to environmental challenges. In high-temperature or high-glare conditions, buildings with responsive shading inspired by floral behaviors can mitigate heat gain, reducing cooling demands and energy costs [25]. Similarly, adaptive facades that respond to wind or precipitation protect interiors from extreme conditions while enhancing the durability of the building envelope [26]. Such adaptive architecture not only conserves energy but also represents a sustainable approach to urban design, where buildings mirror the responsive, self-regulating capacities seen in nature [27].

By adopting these natural behavioral patterns, architects can redefine the relationship between buildings and their environments. Buildings can evolve from static structures into adaptable, living entities capable of interacting dynamically with external elements [28]. This approach not only amplifies the functional and aesthetic value of architecture but also fosters a sense of harmony with the natural world. Through the lens of *florism*, architecture becomes a participatory element within its ecosystem, working synergistically with environmental forces to create sustainable, resilient, and visually compelling spaces [29].

Sunflower: Solar Tracking Facades



Fig. 8. Sunflower (image source- <https://www.almanac.com/plant/sunflowers>)

Sunflowers (Fig. 8.) can actively follow the movement of the sun throughout the day [30, 31]. This phenomenon is known as heliotropism [30]. Architects have observed and studied this and developed sun-tracking mechanisms that adjust the position of solar panels or kinetic façades that help to improve visual and thermal comfort [30, 31]. For example, Abu Dhabi Investment Council New Headquarters – Al Bahr Towers (fig. 9) designed by architect Abulmajid Karanouh include two 150m high circular towers each with a dynamic frame consisting of shading devices made from triangular units inspired by the traditional Islamic object the “Mashrabiya” and aligned in a honeycomb pattern [30, 32]. Each individual device unfolds to various angles in response to the movement of the sun [32, 33]. The computer-controlled shading devices system allows it to react to ideal solar and lighting conditions [32, 33]. This system reduces the dependence on air conditioners in scorching hot temperatures in the UAE and provides shade and it not only provides shade but also optimizes the distribution of natural light and creates visually engaging spaces [32, 33].



Fig. 9. Al Bahr Towers (image source- <https://www.archdaily.com/270592/al-bahar-towers-responsive-facade-aedas/5d5311e8284dd1737600009a-al-bahar-towers-responsive-facade-aedas-image>)

Fibonacci Sequence

Numerous plant species include the Fibonacci sequence, also known as the Golden Ratio which mathematically represents the "perfection of nature" [34, 35]. Leonardo of Pisa published the Fibonacci sequence in the "Liber Abaci," or "Book of Calculus," in 1202 and his series of numbers go as follow (1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89,...). The aligning of the sunflower seeds is a classic example for this phenomenon. The golden ratio has been repeatedly used in many architectural designs throughout the history such as Taj Mahal, Parthenon [35].

The inspiration for the core building (Fig. 10.) of the Eden project designed by Jolyon Brewis of Nicholas Grimshaw and Partners was drawn by studying the spirals of the sunflower, pinecones and pineapples [36]. Fibonacci Spirals can be observed in the core roof and there are skylights to capture the sunlight. There are solar panels fixed on the core roof. The building was meant to be energy-efficient, suited for its intended use, future-proof, manufactured with materials obtained sustainably, and built with minimal waste [36].



Fig. 10. The Eden Project: The Core roof
(image source-https://grimshaw.global/projects/gallery/?i=578&p=03126_N349_a3)

Lotus: Purity and Ultra-Hydrophobicity



Fig. 11. Lotus Flower
(image source- <https://bouqs.com/blog/lotus-flower-meaning-and-symbolism/>)

While lotus flowers (fig. 11) do not display notable behaviours like sunflowers, their unique characteristics and symbolism have inspired *florism-oriented* design principles [37]. Lotus flowers are sacred in both Buddhism and Hinduism [37]. They stand for purity, enlightenment, and rebirth, and have deep cultural and symbolic significance in many countries [37]. The symbolism of lotuses can be used to create buildings that express serenity, harmony, and spiritual connections. Lotus flowers have elegant yet curving shapes that can influence the arrangement and contour of architectural designs. To replicate the soft arcs and arcing lines present in the petals, leaves, and seed pods of lotus flowers, architects can use lotus-inspired architectural features. This can be portrayed by curved building facades, winding streets, or fluid internal spaces, which add visual appeal and foster a sense of organic fluidity. Lotuses emerge within the water and typically remain unaffected by dirt or contamination there [37]. Water features like ponds, reflecting pools, or even wetland gardens can be used under *florism* architecture. These components not only relate to the lotus flower's natural environment but also foster biodiversity, serenity, and act as a symbol of life's ongoing regeneration.

The People's Park surrounding the Lotus building also features extensive green space reflecting the natural environment conducive for the Lotus to thrive [17]. More than 2,500 geothermal piles have been driven into the base of the artificial lake that surrounds the structure. The entire water mass of the lake and the ground beneath it is used for the pre-cooling (summer) and preheating (winter) air conditioning systems for the Lotus and the two-storied building beneath the lake [17].

The lotus tower in Colombo, Sri Lanka (Fig. 12) is another symbolic landmark. The 350m high tower resembles a blooming lotus bud and is covered with a series of overlapping petals [38]. It stands out in the city with its vibrant colours and illuminates at night.



Fig. 12. The Lotus Tower
(image source- <https://www.flickr.com/photos/pocheco/45763101934/in/photostream/>)

The "lotus effect," or ultra-hydrophobicity, is a property of lotus leaves [37]. This ultra-hydrophobicity trait could ensure that the leaf's upper epidermis is not submerged in water. Ultra-hydrophobicity is thought to have served the lotus well in its evolutionary development as a result. Studies have revealed that it is accomplished by a unique dense coating of waxy papillae on the surface of the lotus leaf [37]. Many research projects have been conducted to create highly durable, self-cleaning ultra-hydrophobic coatings which can resist staining and reduce maintenance needs [37].

Morning Glory: The Circadian Rhythm



Fig. 13. Morning Glory

(image source- <https://www.almanac.com/plant/morning-glories>)

Morning glory (Fig. 13.) is known for its circadian rhythm of opening in the morning and closing in the evening. The circadian rhythm roughly follows a 24-hour cycle [39]. Light is primarily responsible for causing Morning Glory flowers to open and close. Blue light wavelengths in particular are quite sensitive to variations in light intensity for flowers. Morning exposure to sunlight or artificial light causes flowers to quickly open their petals in response. In the evening or when it's gloomy, they close their petals. In addition to light, environmental factors like temperature and humidity can also affect how Morning Glory flowers behave. The timing and length of their daily cycle may be impacted by extreme temperatures or adverse humidity levels [39]. The Morning Glory flower's circadian rhythm is adaptable and has multiple functions such as drawing pollinators, including bees and butterflies, who are more active during the day [39]. The flowers preserve energy, protect their reproductive structures from harm, and shield themselves from nocturnal herbivores by closing up at night [39]. This can be incorporated in *florism-oriented* designs by creating responsive facades that mimic these behavioural patterns. These responsive facades can optimise natural lighting, control solar heat gain, and enhance energy efficiency in buildings.

Future Directions and Innovations in *Florism*-Based Architecture

As the architectural field continues to evolve, *florism* opens doors to a new frontier where aesthetics, functionality, and environmental responsibility

converge. Future innovations in *florism*-based architecture may capitalize on advanced technologies and materials, allowing buildings to behave more like natural organisms, responsive to both immediate and long-term environmental needs [40]. With an emphasis on sustainability and resilience, *florism* offers promising pathways to redefine how architecture interacts with its surroundings and adapts to the pressing challenges of urbanization and climate change [40].

One potential direction for *florism* lies in advanced biomimetic materials that mimic the specific properties of floral structures. For instance, ultra-lightweight composites that replicate the cellular structure of petals could provide high strength with minimal material use, reducing resource consumption in constructions [41, 42]. Additionally, the creation of hydrophobic and self-cleaning surfaces inspired by the lotus effect could greatly reduce maintenance needs and enhance durability, particularly in urban settings with high pollution. Research into these materials, including developments in bio-engineered textiles and 3D-printed organic structures, could enable architects to produce building facades and components that inherently resist weathering, repel dirt, and support passive climate control [41].

Integration of Artificial Intelligence (AI) and Smart Systems is another promising avenue for *florism*-based architecture. With AI, buildings can become "intelligent," adapting autonomously to changing environmental conditions in real time [43]. Inspired by the way flowers respond to light and temperature, AI-driven systems could control dynamic shading, ventilation, and even water distribution to optimize energy efficiency and occupant comfort. For example, sensors that detect sunlight or temperature changes could automatically adjust window opacity, much like petals opening and closing in response to sunlight. The development of such intelligent, adaptable systems transforms buildings into responsive, self-regulating ecosystems, reducing energy use and supporting the well-being of occupants [43, 44].

Expanding *florism* to urban planning and green infrastructure also holds significant potential. Applying *florism* at an urban scale, architects and planners could design entire neighborhoods or districts that emulate natural ecosystems [45]. *florism*-inspired planning would prioritize green corridors, rooftop gardens, and interconnected spaces that encourage biodiversity and facilitate ecological networks within cities [45]. Buildings designed under *florism* principles could integrate seamlessly with urban greenery, promoting air purification, reducing urban heat, and creating pleasant environments for city dwellers. Such an approach fosters sustainable communities

where urban design is in harmony with local flora, providing valuable ecological and social benefits [45].

Incorporating renewable energy solutions inspired by floral structures represents yet another innovative approach. Flowers efficiently capture sunlight, water, and nutrients, often storing or redistributing them as needed. Following this model, buildings could employ renewable energy systems that mimic these natural processes, such as solar panels arranged in petal-like configurations to maximize exposure and energy capture [19, 32]. The concept of energy storage and distribution could be modelled after plant nutrient systems, with energy captured during peak sunlight hours stored in integrated batteries for later use, optimizing energy availability while reducing grid dependency [46].

As climate change and urbanization continue to impact global cities, *florism*-based architecture provides a visionary yet practical solution for the future [1]. By drawing on the adaptive qualities and efficiency of flowers, architects can design structures that enhance ecological balance and foster resilient, sustainable communities. The future of *florism*-based architecture lies in our capacity to merge the wisdom of nature with technological advancements, forging a path toward an urban landscape that breathes, grows, and evolves in harmony with the natural world [9, 10].

Conclusions. The above study was inspired by sensitivity to environmental issues the present architectural mechanisms have created, turning the concept of urbanization into a process of creating concrete jungles filled with torturous eyesores. As a solution to the present crisis, biomimetics has evolved in a small way in certain parts of the world through the involvement of architects and engineers who have a humanitarian bent in civil engineering and the construction industry. The identification of floral morphology along with the external organic structures of flowers such as the lotus, sunflower, and morning glory, together with their imaginative use for designing various constructional components of a building is what has been attempted in the discussion above. The new concept presented here in terms of *florism* represents a new dimension of biomimetics. There, all provisions of biomimetics are observed but under the structural designs of flowers. Accordingly, it is claimed that all constituents of flowers are found usable in modelling structural and functional features of buildings designed under *florism*. In fact, in the construction sector rigid structures are much easier to build up than organic ones. That means, in terms of executing the concrete work, it poses challenges to civil engineers. Yet if such intricacies are overcome, the outcome of the effort will have long-lasting benefits. The costs incurred in the

construction can be easily recovered in the process of mobilisation and maintenance of the buildings that emerge under the rationale of this innovative design principle.

REFERENCES

1. Fuladlu K., Riza M., Ilkan M. The effect of rapid urbanization on the physical modification of urban area. *Journal of Urban Studies*. 2018. Pp. 183.1–183.9
2. Verbrugghe N., Rubinacci E., Khan A.Z. Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods. *Biomimetics*. 2023. Vol. 8. 107. DOI: 10.3390/biomimetics8010107
3. Lebedev Y.S. *Architectural Bionics [Arkhitekturnaya bionika]*. Moscow. 1990. 267 p.
4. Gruber P., Jeronimidis G. Has biomimetics arrived in architecture?. *Bioinspiration & biomimetics*. 2012. Vol. 7. Pp. 1–2. DOI: 10.1088/1748-3182/7/1/010201
5. Gridyushko A.D. Biomimetic principles in architectural design [Biomimeticheskie printsipy v arkhitekturnom proektirovanii]: dissertation. PhD. 2013. 212 p.
6. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "flower". *Encyclopedia Britannica*. 17 Apr. 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.britannica.com/science/flower> (date of access: 01.10.2023)
7. Stevens P., Zimmermann M. H., Stevenson D. W., Berry P. E., Cronquist A., Dilcher D. L. "angiosperm". *Encyclopedia Britannica*. 3 Jun. 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.britannica.com/plant/angiosperm/Reproductive-structures> (date of access: 29.09.2023)
8. Speck T., Burgert I. Plant stems: Functional design and mechanics. *Annual Review of Materials Research*. 2011 Vol. 41. Pp. 169–193. DOI: 10.1146/annurev-matsci-062910-100425
9. Mazzoleni I., Price S. *Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design*. Boca Raton: CRC Press. 2013. DOI: 10.1201/b14573.
10. Jiang, L., Hassan T.M. Biomimetic design and structures: Principles, examples, and applications. *Procedia CIRP*. 2016 Vol. 50. Pp. 26–30. DOI: 10.1080/17508975.2015.1032193
11. Jersakova J., Jürgens A., Šmilauer P., Johnson S. The evolution of floral mimicry: Identifying traits that visually attract pollinators. *Functional Ecology*. 2012. Vol. 26. Pp. 1381–1389. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2012.02059.x.
12. Sahil M. Case Study on Architecture of Lotus Temple. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Pp. 1355–1360. DOI: 10.17577/IJERTV9IS050907

13. Ji Y., Cook M. J., Hanby V., Infield D. G., Loveday D. L., Mei L. CFD modelling of naturally ventilated double-skin facades with Venetian blinds. *Journal of Building Performance Simulation*. 2008. Vol. 1(3). Pp. 185–196.
14. Jonathan Massey. "The Gherkin: How London's Famous Tower Leveraged Risk and Became an Icon (Part 2)". *ArchDaily*. 12 Nov. 2013. [Electronic resource]. URL: <https://www.archdaily.com/447205/the-gherkin-how-london-s-famous-tower-leveraged-risk-and-became-an-icon-part-2> (date of access: 03.10.2023)
15. Zhou Q., Shi M., Zhang H., Zhu Z. Comparative Study of the Petal Structure and Fragrance Components of the *Nymphaea* hybrid, a Precious Water Lily. *Molecules*. 2022. Vol. 27(2). 20. DOI: 10.3390/molecules27020408
16. Zhang Y., Sun T., Xie L., Hayashi T., Kawabata S., Li Y. Relationship between the velvet-like texture of flower petals and light reflection from epidermal cell surfaces. *Journal of plant research*. 2015. Vol. 128. Pp. 623–632. DOI: 10.1007/s10265-015-0725-8
17. The Lotus Building and People's Park/ studio505. *ArchDaily*. 07 Jul. 2014. [Electronic resource]. URL: <https://www.archdaily.com/521699/the-lotus-building-and-people-s-park-studio505> (date of access: 04.10.2023)
18. Amy A. Artscience Museum an Embedded Stand-Alone Art. *Journal La Multiapp*. 2020. Vol. 1. Pp. 1–9. DOI: 10.37899/journallamultiapp.v1i1.34
19. Alex Smith. Case Study Wuhan Energy Flower. China in Bloom / CIBSE Journal. 2015. [Electronic resource]. URL: <http://portfolio.cpl.co.uk/CIBSE/201501/case-study-wuhan/> (date of access: 04.12.2023)
20. Badarnah L., Kadri U. A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*. 2015. Vol.58(2). Pp. 120–133. DOI: 10.1080/00038628.2014.922458
21. Faragalla A.M.A., Asadi, S. Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture. *Energies*. 2022. Vol. 15. 5390. DOI:10.3390/en15155390
22. Gastón S.C., Gonzalez-Lezcano R.A., Fernandez E., Perez M.C. Architecture Learns from Nature. The Influence of Biomimicry and Biophilic Design in Building. *Modern Applied Science*. 2023. Vol. 17. 58. DOI: 10.5539/mas.v17n1p58.
23. Badarnah L. Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation. *Buildings*. 2017. Vol. 7(2). 40. DOI: 10.3390/buildings7020040
24. Hosseini S.M., Mohammadi M., Rosemann A., Schröder T.W., Lichtenberg J.J. A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. *Building and Environment*. 2019. Vol. 153. Pp. 186–204. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.040
25. Loonen R.C.G.M. Bio-inspired Adaptive Building Skins. In: Pacheco Torgal, F., Labrincha, J., Diamanti, M., Yu, C.P., Lee, H. (eds) *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer, Cham. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_5
26. Chayaamor-Heil N. From Bioinspiration to Biomimicry in Architecture: Opportunities and Challenges. *Encyclopedia*. 2023. Vol. 3. Pp. 202–223. DOI: 10.3390/encyclopedia3010014.
27. Ergün R., Aykal F. The use of biomimicry in architecture for sustainable building design: a systematic review. *alam cipta. International Journal Of Sustainable Tropical Design & Practice*. 2022. Vol. 15. Pp. 24–37. DOI: 10.47836/AC.15.2.PAPER03.
28. Maibritt P. Z. Biomimetic Urban and Architectural Design: Illustrating and Leveraging Relationships between Ecosystem Services. *Biomimetics*. 2020. Vol. 6. 2. DOI: 10.3390/biomimetics6010002.
29. Kellert S.R., Calabrese E.F. The practice of biophilic design. *Intelligent Buildings International*. 2015. Vol. 7(4). Pp. 182–191. DOI: 10.1080/17508975.2015.1032193
30. Joshua P., Vandenbrink E.A. Brown S.L.H., Benjamin K.B. Turning heads: The biology of solar tracking in sunflower. *Plant Science*. 2014. Vol. 224. Pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.plantsci.2014.03.014
31. Kutschera U., Briggs W.R. Phototropic solar tracking in sunflower plants: an integrative perspective. *Annals of Botany*. 2015. Vol. 117(1). Pp. 1–8. DOI: 10.1093/aob/mev141.
32. S hady A. Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. *QScience Proceedings*. 2016. 8. DOI: 10.5339/qproc.2016.qgbc.8.
33. Karanouh A., Kerber E. Innovations in dynamic architecture. *Journal of Facade Design and Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 185–221. DOI: 10.3233/FDE-150040.
34. He H., Wang C. Fibonacci sequences and the aesthetics of nature's forms in modern design. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, Sciendo*. 2024. Vol. 9 No. 1. DOI: 10.2478/amns-2024-1689
35. Zeina A. The Golden ratio and its impact on Architectural design. *International Design Journal*. 2022. Vol. 12. Pp. 77–90. DOI: 10.21608/idj.2022.113126.1031.
36. Architecture of the Core building. [Electronic resource]. URL: <https://www.edenproject.com/mission/about-our-mission/architecture> (date of access: 03.10.2023)

37. Lin Z., Zhang C., Cao D., Damaris R.N., Yang P. The Latest Studies on Lotus (*Nelumbo nucifera*)-an Emerging Horticultural Model Plant. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20. 13. DOI: 10.3390/ijms20153680

38. Colombo Lotus Tower. Transforming the Landscape of Colombo. [Electronic resource]. URL: <https://colombolotustower.lk/our-story/> (date of access: 03.10.2023)

39. Hoshino O., Kamada H. Daily Rhythm of Sensitivity to Inductive Light Pulses in Morning Glory. *Plant Signaling & Behavior*. 2006. Vol. 1(3). Pp. 119-122. DOI: 10.4161/psb.1.3.2676

40. Hargroves K., Smith M. Innovation inspired by nature: Biomimicry. *ECOS*. 2006. Vol. 129. Pp. 27-29. DOI: 10.1071/EC129p27.

41. Abera Y. Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials*. 2024. Vol. 33. DOI: 10.1177/26349833241255957.

42. Aguilar-Planet M.T., Peralta M.E. Innovation Inspired by Nature: Applications of Biomimicry in Engineering Design. *Biomimetics*. 2024. Vol. 9. 523. DOI: 10.3390/biomimetics9090523.

43. Manuel H., Manuel A., Musa H. The Role of Ai in Enhancing Energy Efficiency in Modern Construction: Innovations and Transforming Construction and Design Practices for A Greener Future. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4888643.

44. Ortega-Fernández A., Martín-Rojas R., García-Morales V. Artificial Intelligence in the Urban Environment: Smart Cities as Models for Developing Innovation and Sustainability. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. 7860. DOI: 10.3390/su12197860.

45. Tzoulas K., et al. Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure: A Literature Review. *Landscape and Urban Planning*, 2007. Vol. 81. Pp. 167-178. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

46. Dodón A., Quintero V., Chen Austin M. Energy Storage System based on Biomimetic Strategies: Concept Design and Performance Assessment in Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2385. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2385/1/012027.

Information about the authors

Fonseka, E.A. Gaavithri. Postgraduate student. E-mail: eagaavithrif@gmail.com. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 4

Romanov, Oleg S. PhD, Professor in the Department of Architectural Design, SPBGASU. E-mail: romanovos@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St Petersburg, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 4

Поступила 17.07.2024 г.

© Фонсека Э.А.Г., Романов О.С., 2025

***Фонсека Э.А.Г., Романов О.С.**

Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет

**E-mail: eagaavithrif@gmail.com*

ФЛОРИЗМ: ОБЪЕДИНЕНИЕ БИОМИМЕТИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ С РАЗНООБРАЗНЫМИ ЦВЕТОЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ

Аннотация. Биомиметика в архитектуре, вдохновленная структурными особенностями различных природных образований биосферы, помогает создать методологическую основу для принятия и преобразования биологических стратегий в проектные инновации. В связи с этим в статье под новым термином "флоризм" представлена новая концепция, рассматривающая принцип проектирования, ориентированного на устойчивое развитие, который сформировался в духе включения различных частей цветов в архитектурные проекты с эстетическим и конструктивным восприятием их структурных и функциональных качеств. В данной работе приводятся примеры из нескольких существующих архитектурных проектов, вдохновленных формами и функциями цветов, с целью обоснования прикладных решений, которые могут быть разработаны для обеспечения функциональности и устойчивости зданий, спроектированных в рамках флоризма. Кроме того, в статье рассматриваются инновации в строительной индустрии в рамках флоризма, которые могут повысить эстетическую и функциональную эффективность архитектурных проектов в целом.

Ключевые слова: флоризм, биомиметическая архитектура, устойчивый дизайн, энергоэффективность, биомиметические принципы, архитектура и цветы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fuladlu K., Riza M., Ilkan M. The effect of rapid urbanization on the physical modification of urban area // *Journal of Urban Studies*. 2018. Pp.183.1–183.9.
2. Verbrugghe N., Rubinacci E., Khan A.Z. Biomimicry in Architecture: A Review of Definitions, Case Studies, and Design Methods // *Biomimetics*. 2023. Vol. 8. 107. DOI: 10.3390/biomimetics8010107
3. Лебедев Ю.С. Архитектурная бионика. Стройиздат. Москва. 1990. 267 с.
4. Gruber P., Jeronimidis G. Has biomimetics arrived in architecture? // *Bioinspiration & biomimetics*. 2012. Vol. 7. Pp. 1–2. DOI: 10.1088/1748-3182/7/1/010201
5. Гридюшко А.Д. Биомиметические принципы в архитектурном проектировании: диссертация. Канд. наук. 2013. 212 с.
6. Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "flower" // *Encyclopedia Britannica*. 17 Apr. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.britannica.com/science/flower> (дата обращения: 01.10.2023)
7. Stevens P., Zimmermann M. H., Stevenson D.W., Berry P.E., Cronquist A., Dilcher D.L. "angiosperm" // *Encyclopedia Britannica*. 3 Jun. 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.britannica.com/plant/angiosperm/Reproductive-structures> (дата обращения: 29.09.2023)
8. Speck T., Burgert I. Plant stems: Functional design and mechanics // *Annual Review of Materials Research*. 2011 Vol. 41. Pp. 169–193. DOI: 10.1146/annurev-matsci-062910-100425
9. Mazzoleni I., Price S. *Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design* // Boca Raton: CRC Press. 2013. 231. DOI: 10.1201/b14573.
10. Jiang L., Hassan T.M. Biomimetic design and structures: Principles, examples, and applications // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 50. Pp. 26–30. DOI: 10.1080/17508975.2015.1032193
11. Jersakova J., Jürgens A., Šmilauer P., Johnson S. The evolution of floral mimicry: Identifying traits that visually attract pollinators // *Functional Ecology*. 2012. Vol. 26. Pp. 1381–1389. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2012.02059.x.
12. Sahil M. Case Study on Architecture of Lotus Temple // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Pp. 1355–1360. DOI: 10.17577/IJERTV9IS050907
13. Ji Y., Cook M. J., Hanby V., Infield D. G., Loveday D. L., Mei L. CFD modelling of naturally ventilated double-skin facades with Venetian blinds // *Journal of Building Performance Simulation*. 2008. Vol. 1(3). Pp. 185–196.
14. Jonathan Massey. "The Gherkin: How London's Famous Tower Leveraged Risk and Became an Icon (Part 2)" // *ArchDaily*. 12 Nov. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.archdaily.com/447205/the-gherkin-how-london-s-famous-tower-leveraged-risk-and-became-an-icon-part-2> (дата обращения: 03.10.2023)
15. Zhou Q., Shi M., Zhang H., Zhu Z. Comparative Study of the Petal Structure and Fragrance Components of the *Nymphaea* hybrid, a Precious Water Lily // *Molecules*. 2022. Vol. 27(2). 20. DOI: 10.3390/molecules27020408
16. Zhang Y., Sun T., Xie L., Hayashi T., Kawabata S., Li Y. Relationship between the velvet-like texture of flower petals and light reflection from epidermal cell surfaces // *Journal of plant research*. 2015. Vol. 128. Pp. 623–632. DOI: 10.1007/s10265-015-0725-8
17. The Lotus Building and People's Park / studio505 // *ArchDaily*. 07 Jul. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.archdaily.com/521699/the-lotus-building-and-people-s-park-studio505> (дата обращения: 04.10.2023)
18. Amy A. Artscience Museum an Embedded Stand-Alone Art // *Journal La Multiapp*. 2020. Vol. 1. Pp. 1–9. DOI: 10.37899/journallamultiapp.v1i1.34
19. Smith A. Case Study Wuhan Energy Flower // *China in Bloom / CIBSE Journal*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://portfolio.cpl.co.uk/CIBSE/201501/case-study-wuhan/> (дата обращения: 04.12.2023)
20. Badarnah L., Kadri U. A methodology for the generation of biomimetic design concepts // *Architectural Science Review*. 2015. Vol. 58(2). Pp. 120–133. DOI: 10.1080/00038628.2014.922458
21. Faragalla A.M.A., Asadi S. Biomimetic Design for Adaptive Building Façades: A Paradigm Shift towards Environmentally Conscious Architecture // *Energies*. 2022. Vol. 15. 5390. DOI:10.3390/en15155390
22. Gastón S.C., Gonzalez-Lezcano R.A., Fernandez E., Perez M.C. Architecture Learns from Nature. The Influence of Biomimicry and Biophilic Design in Building // *Modern Applied Science*. 2023. Vol. 17. 58. DOI: 10.5539/mas.v17n1p58.
23. Badarnah L. Form follows environment: Biomimetic approaches to building envelope design for environmental adaptation // *Buildings*. 2017. Vol. 7(2). 40. DOI: 10.3390/buildings7020040
24. Hosseini S.M., Mohammadi M., Rosemann A., Schröder T.W., Lichtenberg J.J. A morphological approach for kinetic façade design process to im-

prove visual and thermal comfort: Review // *Building and Environment*. 2019. Vol. 153. Pp. 186–204. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.02.040

25. Loonen R.C.G.M. Bio-inspired Adaptive Building Skins. In: Pacheco Torgal, F., Labrincha, J., Diamanti, M., Yu, C.P., Lee, H. (eds) *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer, Cham. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_5

26. Chayaamor-Heil N. From Bioinspiration to Biomimicry in Architecture: Opportunities and Challenges // *Encyclopedia*. 2023. Vol. 3. Pp. 202–223. DOI: 10.3390/encyclopedia3010014.

27. Ergün R., Aykal F. The Use Of Biomimicry In Architecture For Sustainable Building Design: A Systematic Review // *Alam Cipta International Journal Of Sustainable Tropical Design & Practice*. 2022. Vol. 15. Pp. 24-37. DOI: 10.47836/AC.15.2.PA-PER03.

28. Maibritt P.Z. Biomimetic Urban and Architectural Design: Illustrating and Leveraging Relationships between Ecosystem Services // *Biomimetics*. 2020. Vol. 6. 2. DOI: 10.3390/biomimetics6010002.

29. Kellert S.R., Calabrese E.F. The practice of biophilic design // *Intelligent Buildings International*. 2015. Vol. 7(4), Pp. 182–191. DOI: 10.1080/17508975.2015.1032193

30. Joshua P. Vandenbrink, Evan A. Brown, Stacey L. Harmer, Benjamin K. Blackman. Turning heads: The biology of solar tracking in sunflower // *Plant Science*. 2014. Vol. 224. Pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.plantsci.2014.03.014

31. Kutschera U, Briggs WR. Phototropic solar tracking in sunflower plants: an integrative perspective // *Annals of Botany*. 2015. Vol. 117(1). 1–8. DOI: 10.1093/aob/mcv141.

32. Shady A. Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE // *QScience Proceedings*. 2016. Pp. 8. DOI: 10.5339/qproc.2016.qgbc.8.

33. Karanouh A., Kerber E. Innovations in dynamic architecture // *Journal of Facade Design and Engineering*. 2015. Vol. 3. Pp. 185–221. DOI: 10.3233/FDE-150040.

34. He H., Wang C. Fibonacci sequences and the aesthetics of nature's forms in modern design // *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Sciendo. Vol. 9. No. 1. DOI: 10.2478/amns-2024-1689

35. Zeina A. The Golden ratio and its impact on Architectural design.// *International Design Journal*.

2022. Vol. 12. Pp. 77-90. DOI: 10.21608/idx.2022.113126.1031.

36. Architecture of the Core building. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.edenproject.com/mission/about-our-mission/architecture> (дата обращения: 03.10.2023)

37. Lin Z., Zhang C., Cao D., Damaris R.N., Yang P. The Latest Studies on Lotus (*Nelumbo nucifera*)-an Emerging Horticultural Model Plant // *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. Vol. 20. 13 c. DOI: 10.3390/ijms20153680

38. Colombo Lotus Tower. Transforming the Landscape of Colombo. [Электронный ресурс]. URL: <https://colombolotustower.lk/our-story/> (дата обращения: 03.10.2023)

39. Hoshino O., Kamada H. Daily Rhythm of Sensitivity to Inductive Light Pulses in Morning Glory // *Plant Signaling & Behavior*. 2006. Vol. 1(3). Pp. 119–122. DOI: 10.4161/psb.1.3.2676

40. Hargroves K., Smith M. Innovation inspired by nature: Biomimicry // *ECOS*. 2006. Vol. 129. Pp. 27–29. DOI: 10.1071/EC129p27.

41. Abera Y., Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction // *Composites and Advanced Materials*. 2024. Vol. 33. DOI: 10.1177/26349833241255957.

42. Aguilar-Planet M.T., Peralta M. E. Innovation Inspired by Nature: Applications of Biomimicry in Engineering Design // *Biomimetics*. 2024. Vol. 9. Pp. 523. DOI: 10.3390/biomimetics9090523.

43. Manuel H., Manuel A., Musa H. The Role of Ai in Enhancing Energy Efficiency in Modern Construction: Innovations and Transforming Construction and Design Practices for A Greener Future // *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4888643.

44. Ortega-Fernández A., Martín-Rojas R., García-Morales V. Artificial Intelligence in the Urban Environment: Smart Cities as Models for Developing Innovation and Sustainability // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 7860. 10.3390/su12197860.

45. Tzoulas, K., et al. Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure: A Literature Review // *Landscape and Urban Planning*, 2007. Vol. 81. Pp. 167–178. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

46. Dodón A., Quintero V., Chen Austin M. Energy Storage System based on Biomimetic Strategies: Concept Design and Performance Assessment in Buildings // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2385. Pp. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2385/1/012027.

Информация об авторах

Фонсека Эдирисингха Арачхиге Гаавитхри, аспирант кафедры «Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности». E-mail: eagaavithrif@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Романов Олег Сергеевич, Кандидат архитектуры (1987), Профессор кафедры архитектурного проектирования. E-mail: romanovos@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

Received 17.07.2024

Для цитирования:

Фонсека Э.А.Г., Романов О.С. Флоризм: объединение биомиметической архитектуры с разнообразными цветочными структурами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 68–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-68-81

For citation:

Fonseka E.A.G., Romanov O.S. Florism: fusing biomimetic architecture with diverse flower structures. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 68–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-68-81

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-82-94

Аслямов А.А., *Щур С.Ю., Зубов А.Г.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: semtyon@yandex.ru

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗОН ОСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Аннотация. Работа посвящена вопросам проектирования и функционирования зон остановок наземного транспорта. Сформулированы принципы организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга. Рассмотрены основные вопросы проектирования остановочных павильонов. Определен перечень необходимого оборудования и элементов зоны остановки для корректной работы общественного транспорта. Целью работы является формулировка и определение основных принципов организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга. Метод исследования основан на анализе научной и технической литературы об особенностях создания и работы зон остановки наземного транспорта. Изучаются методы формирования этих зон и их оснащение необходимым оборудованием. Используется метод фотофиксации для анализа и выявления недостатков существующих решений. В работе проводится анализ аспектов формирования и развития транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга и других городов-миллионников для выявления проблем в процессе эксплуатации и вопросов, связанных с их проектированием для безопасных и комфортных условий эксплуатации. Исследуются принципы формирования зон остановок наземного транспорта в качестве основы поиска и решения задач оптимального функционирования и безопасной эксплуатации. Определяется, что конструкция и внешний вид остановочного павильона позволяют улучшить безопасность и комфорт людей, ожидающих своего транспорта, а также ускорить процесс посадки и высадки пассажиров из прибывающего транспорта. Выявлена основная проблематика размещения остановочных павильонов. Также рассмотрен вопрос особенностей проектирования типовых решений для различных районов города. Сформулированы основные принципы организации зон остановок наземного транспорта. Предложена модульная конструкция остановочного павильона.

Ключевые слова: зона остановки, транспортная инфраструктура, остановочный павильон, устойчивое развитие, урбанизм.

Введение. Городская транспортная инфраструктура Санкт-Петербурга – это большой и сложный комплекс дорожных, транспортных, инженерных и социальных коммуникаций, разработанных для обеспечения комфортной жизнедеятельности граждан и эффективного развития городских районов.

Общественным транспортом Санкт-Петербурга ежедневно пользуются более 1,92 млн. горожан и гостей города. Дорожно-транспортная инфраструктура находится в процессе постоянного и планомерного развития. Для комфортного ожидания транспорта создаются новые павильоны и зоны остановок наземного общественного транспорта, в задачи проектирования которых входит решение ряда вопросов организации городской среды и развития транспортной инфраструктуры города для эффективного использования.

Актуальность темы обусловлена растущим пассажиропотоком, необходимостью удобного и быстрого доступа к маршрутам городского транспорта, а система взаимодействия пассажиров и наземного транспорта требует постоянного мониторинга, пересмотра показателей и дорабо-

ток с целью улучшения функционирования и оптимизации работы. Развитие зон остановок, их привлекательность, функциональность, удобство пользования способно побуждать людей пользоваться общественным транспортом чаще, что положительно сочетается с идеями устойчивого развития урбанизированных территорий и было рассмотрено в работе Иванькиной М.А., Перьковой М.В. [1]. В работе Шевцовой В.В и Нагорной М.С. утверждается, что хорошо организованная система навигации остановок общественного транспорта имеет большое значение и является эффективной, способствует туристической привлекательности, обеспечивает комфортное и эстетически гармоничное городское пространство, а также создаёт условия для безбарьерной среды для людей с ограниченными возможностями [2]. Необходимость применения комплексного подхода в проектировании зон остановок наземного транспорта рассматривается авторами Касаткиной Л.А., Поповой И.А., Удиной И.Л. [3]. Особенности выбора оптимального места для остановки, а также её типа представлены в работе Николаевой Р.В., Ибрагимовой А.А. [4]. Актуальность установки интеллектуальных автобусных остановок определена Шаповаловой Ю.С. [5].

Существуют программы, разработанные для улучшения городской ситуации [6], однако до сих пор возникают вопросы относительно проектирования универсальных, технологичных и экономически оправданных решений.

Целью исследования является формулировка и определение основных принципов организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга. Новизна работы заключается в исследовании принципов формирования зон остановок, которые являются необходимыми и достаточными для стратегии проектирования в зависимости от сформировавшихся городских реалий и условий окружающей среды, а также отказ от их типового проектирования.

Задачи исследования:

- выявить особенности формирования зон остановок наземного транспорта;
- выявить проблемы развития зон остановок общественного транспорта;
- сформулировать принципы организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга;
- разработать концепции модульного павильона остановки наземного транспорта.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод, что вопросы проектирования комфортной и безопасной зоны остановки наземного транспорта остаются актуальными, однако недостаточно освещены вопросы проектирования остановочных павильонов на базе модульных конструкций.

Методология. В основе метода исследования представленной работы лежит анализ научно-технической литературы по особенностям формирования и функционирования зон остановок наземного транспорта. Исследуются подходы в формировании зон, их наполнения необходимым оборудованием. Применяется метод фотофиксации для анализа и определения недостатков существующих решений.

Изучена возможность комплексного подхода при организации зон остановок наземного транспорта в рамках существующей городской инфраструктуры. Рассмотрены методы к проектированию зон остановок наземного транспорта.

За основу берутся принципы формирования транспортно-пересадочных узлов, в частности принцип единства пространственной организации городской среды, в котором данные территории рассматриваются как комплексная городская среда, а также на принципе синтеза, в котором развитие данных территорий рассматривается как единый девелоперский проект [7].

Основная часть. В 2017 году городской администрацией запущен проект «Умный Санкт-Петербург» [8], что говорит об актуальности и

необходимости пересмотра мер по проектированию городской среды нового поколения. Несмотря на значительные успехи в развитии современной городской инфраструктуры с внедрением современных цифровых технологий, новых методов изучения пассажиропотоков, движения пассажирского общественного транспорта, городского трафика, перед проектировщиками встают проблемы создания рациональных, всесторонне продуманных решений [9].

С ростом населения городов и развитием уплотнительной застройки растет нагрузка на городскую инфраструктуру [10]. Реализуемая транспортная реформа в Санкт-Петербурге направлена на решение ряда проблем [11], однако текущее количество городского пассажирского транспорта не всегда справляется в должной мере с растущей нагрузкой. Часто наблюдаются проблемы организации пассажирских перевозок, нередко образуются пробки из автобусов и троллейбусов, ожидающих свою очередь для посадки и высадки людей. Не обеспечивается требуемый комфортный уровень пользования транспортом и необходимые условия соблюдения безопасности при перевозках, что приводит к неудовлетворительному обслуживанию пассажиров. Особенно это заметно в новых микрорайонах с плотной застройкой.

С целью снижения транспортной нагрузки на городскую сеть дорог вводятся ограничительные меры на сквозной проезд крупногабаритного автотранспорта через центральные районы города. К подобным мерам можно отнести ввод в эксплуатацию платных зон парковки, созданную для обеспечения городскому пассажирскому транспорту возможности беспрепятственного перемещения между остановками. Выделенные полосы для движения общественного транспорта способствуют улучшению обстановки, но не решают проблему радикально.

Дорожно-транспортные происшествия создают угрозу безопасности ожидающим своего транспорта пассажирам. Нередки случаи выезда транспортного средства в зону ожидания из-за столкновения или потери управления. Разбирая ситуацию относительно безопасности ожидающих своего транспорта людей, можно привести относительные показатели дорожно-транспортных происшествий, приводящих к травмам.

Установлено, что близкое расположение к перекресткам и дорогам с интенсивным движением ведет к снижению безопасности ожидающих своего транспорта людей. Безопасность нахождения в зоне остановки скорее обусловлена ее расположением относительно дорожной инфраструктуры, нежели конструкцией [12].

Вопросы вызывает также процесс посадки пассажиров на прибывающий трамвай, остановка которого происходит на многополосной дороге [13]. Трамвайные пути располагаются на разделительной части транспортных потоков дороги, что вынуждает пассажиров каждый раз рисковать, выходя на проезжую часть. Эта проблема по сей день является актуальной [14].

Из важных требований к зоне остановки является необходимость обеспечить одинаковую высоту с уровнем пола в трамвае. Такие решения требуют дополнительных средств для реализации. Но с другой стороны это позволяет сделать посадку и посадку для пассажиров более комфортной и безопасной, особенно для лиц пожилого возраста, которым трудно забираться и спускаться с высокой платформы транспорта [4]. Эргономические аспекты требуют особого внимания при проектировании.

Зоны для остановок общественного транспорта являются элементами инфраструктуры города, взаимосвязанные с автомобильными дорогами и трамвайными линиями. Поэтому их местоположение должно быть в границах земель-

ных участков, отведенных под дорогу [15]. Первоначальные факторы [16], которые влияют на проектировании зоны остановки общественного транспорта в городской среде:

1. Существующий профиль дороги.
2. Рельеф местности расположения.
3. Трафик движения транспортных и пешеходных потоков.

Следующими факторами является оснащение зоны остановки, которое необходимо учитывать при проектировании. Данный перечень необходимого оборудования и элементов позволяет создать правильную схему работы для функционирования общественного транспорта в коммуникации городской системы транспортного трафика [17]:

1. Наличие зоны для остановки транспорта.
2. Посадочная зона (необходима для обеспечения комфортной и безопасной посадки и посадки пассажиров. Для создания повышенного комфорта высота бордюра должна совпадать с высотой пола низкопольного автобуса или троллейбуса).
3. Наличие заездного «кармана» для остановки автобуса или троллейбуса (рис. 1).

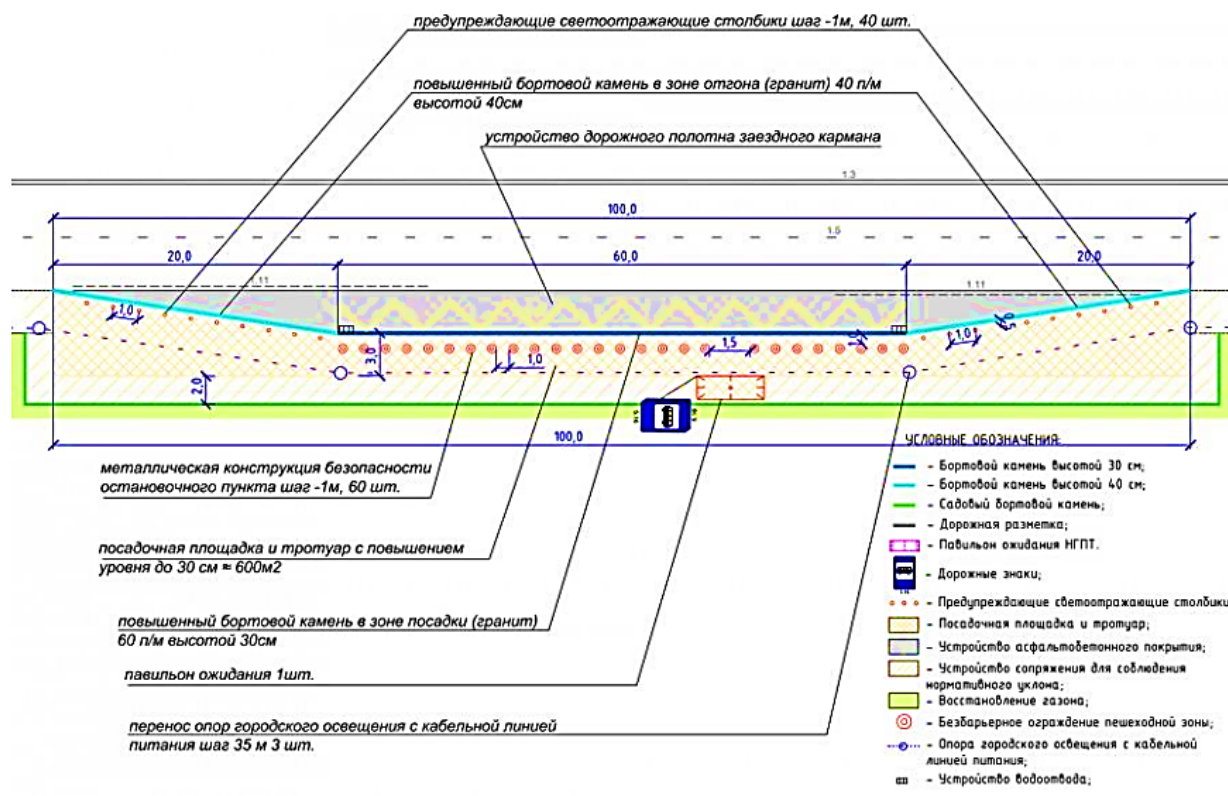


Рис. 1. Пример зонирования места остановки транспорта

При проектировании зон остановок следует уделять внимание многим параметрам, в том числе ширине зоны посадки, типу покрытия, высоте зоны посадки и т.д. [18]. Рассматривая конструктивные особенности можно сделать вывод, что остановочный павильон должен состоять из

прочных материалов, способных выдерживать интенсивное использование и постоянное воздействие внешних факторов.

Он может быть закрытым по крайней мере с двух сторон, являясь эффективным и универсальным решением для защиты от неблагоприятных

погодных условий. Использование в конструкции панелей из закаленного прозрачного стекла обеспечит четкий обзор приближающегося автобуса и площадки посадки пассажиров. Различные пленки или материалы clear view могут добавить выразительные элементы визуальной коммуникации к внешнему виду укрытия. Укрытия должны быть ориентированы лицевой стороной

к полосе движения и ближней стороне посадочной площадки. Однако на некоторых особо узких участках тротуара может потребоваться павильон, обращенный тыльной стороной к проезжей части. На рисунке 2 приведена одна из возможных схем расположения остановочного павильона в зоне остановки.

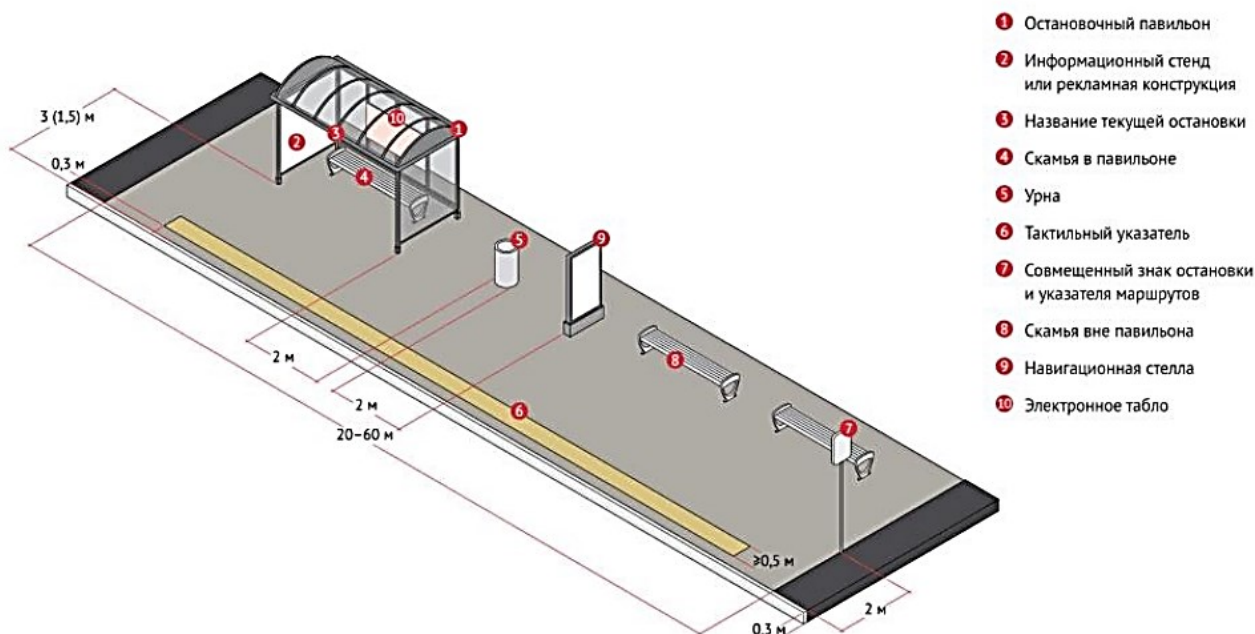


Рис. 2. Конструкция павильона и размещение объектов в зоне остановки ТС

Следует проектировать расположение зон остановки наземного транспорта относительно дорожной инфраструктуры, учитывая также интенсивность трафика, разрешенную скорость на данном участке автодороги, наличие регулируемых пешеходных переходов и т.д. Известно, что размещение остановки у обочины ускоряет посадку и высадку пассажиров, поскольку транспортному средству не нужно тратить время на съезд на стоянку или ждать, чтобы снова влиться в поток транспорта после посадки пассажиров [19].

Фактор зоны влияния автобусных остановок (BSIZ) следует учитывать при проектировании как среды, так и остановочных павильонов. Данный фактор введен для обозначения зоны ухудшения нормального функционирования транспортного потока. Длина зоны отражает состояние движения автобуса вблизи остановки, что влияет на эффективность движения и на уровень загрязнения от вредных выбросов. Количество объектов общественного пользования, длина очереди и объем трафика положительно коррелируют с протяженностью BSIZ. Такие факторы, как большее расстояние между остановкой и перекрестком, большее количество предприятий возле

зоны остановки, а также более высокая иерархия дорог могут помочь уменьшить длину BSIZ, что может способствовать повышению эффективности движения автобуса вблизи остановки и снижению выбросов [20].

На рисунке 3 представлены графики режимов движения в рамках BSIZ, которые делятся на замедление, остановку и ускорение. Представленные графики иллюстрируют возможные варианты развития событий в случае пробок, очереди из автобусов на посадку и высадку пассажиров, а также на выезд из зоны остановки.

В руководствах по разработке городской среды рассматриваются различные варианты компоновки павильонов остановок относительно дороги. В местах остановок автобусов вне улиц, таких как центры пересадки автобусов и стоянки для автомобилей, предпочтение отдается пилообразным автобусным отсекам из-за их эффективного использования ограниченного пространства на обочине (рис. 4) [21, 22].

Пилообразные проезды обычно шире параллельных; однако для них требуется меньшее расстояние до обочины, поскольку автобусы обычно движутся на этих объектах с гораздо меньшей скоростью.

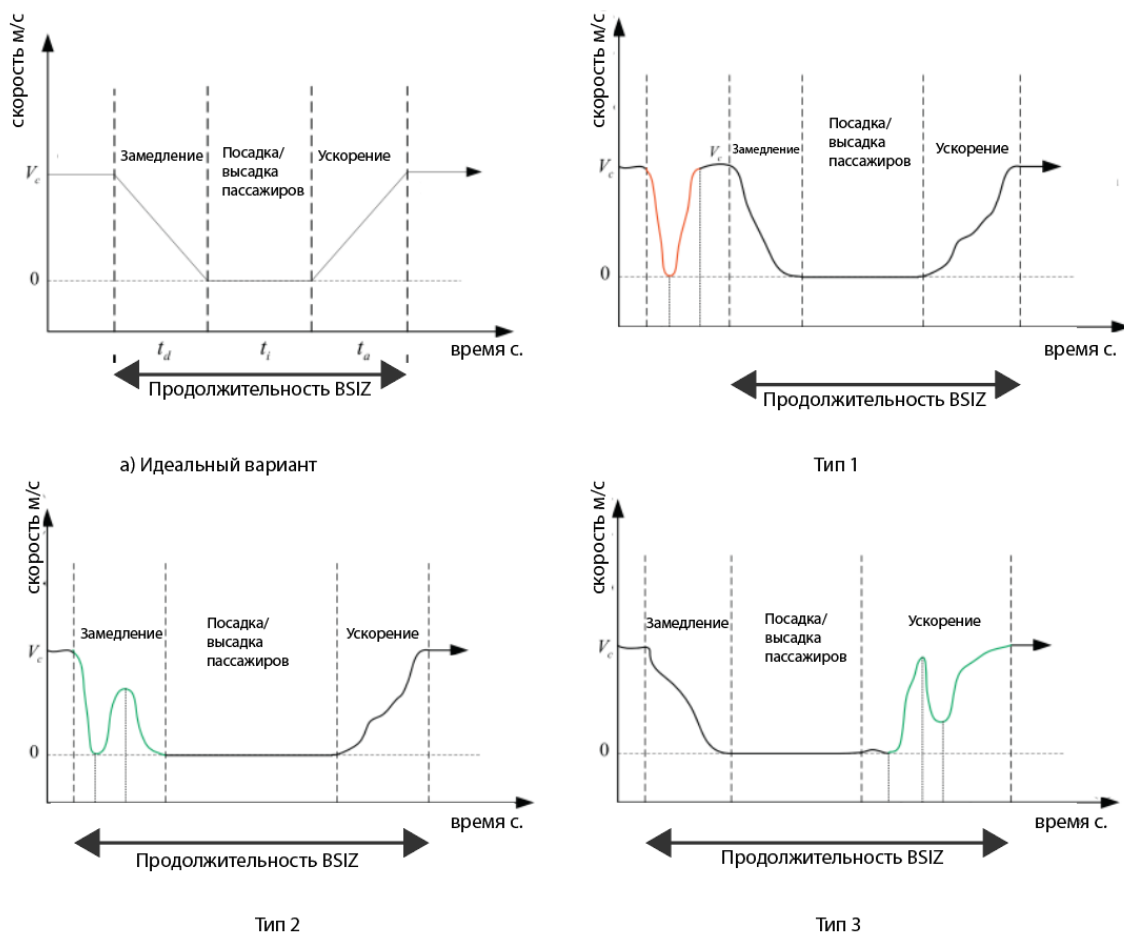


Рис. 3. Графики изменения скорости движения транспорта вблизи автобусной остановки

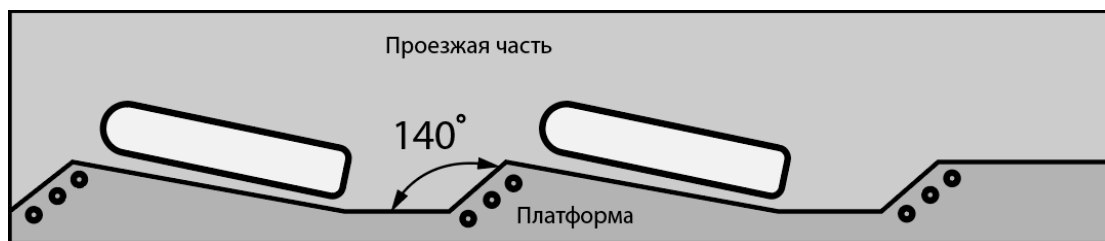


Рис. 4. Пример зонирования пилообразной автобусной остановки

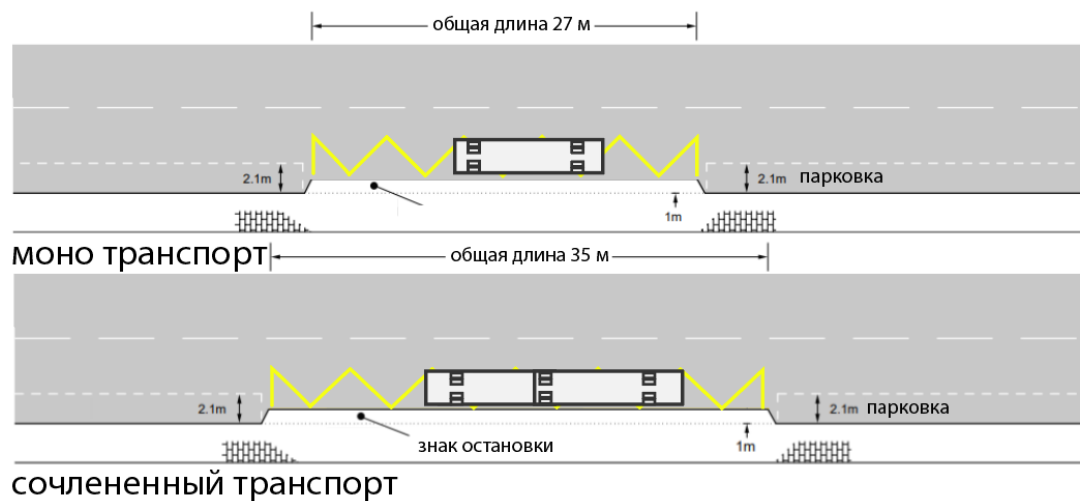


Рис. 5. Размеры зоны остановки для моно и сочлененного транспорта

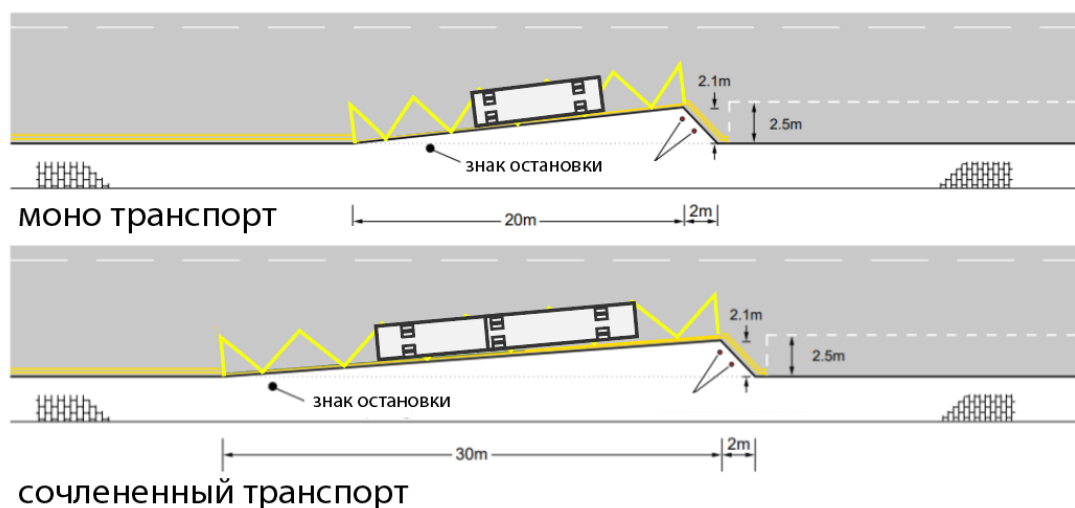


Рис. 6. Зона остановки под углом для моно и сочлененного транспорта

Конструкция остановочных павильонов существенно влияет на работу автобусов. Конструкции, компоновка и размещение остановок статистически влияют на время работы наземного транспорта. В ходе исследования двух наиболее распространенных типов автобусных остановок – автобусный отсек и остановка у обочины выявлено, что автобусы показали лучшие эксплуатационные характеристики на остановках у обочины, чем на автобусных стоянках, с точки зрения среднего времени посадки и высадки пассажиров и времени разгона. Для исследования было выбрано шестнадцать остановок с целью сравнения различия во времени работы на автобусных остановках. Было записано время движения, включая время разгона, время ожидания, время замедления и время задержки. Выведена классификация пяти типов времени задержки [23].

Зоны остановок в Санкт-Петербурге.

Зоны остановок наземного транспорта, вопросы их проектирования и оснащения, размещения и функционирования невозможно рассматривать без изучения общей картины транспортной инфраструктуры города в целом и планировочных характеристик конкретного района. Перспективные проекты планировки новых районов должны

быть основой при разработке зон остановок наземного транспорта, так как в дальнейшем планировочная ситуация может кардинальным образом измениться. Там, где пропускная способность трассы была на приемлемом уровне, через некоторое время могут возникнуть трудности с доступностью к остановкам общественного транспорта.

Проблема расхождения территориального и транспортного планирования города стоит весьма остро, даже без учета новых районов плотной застройки, таких как Мурино и Кудрово, административно относящихся к Ленинградской области, но фактически являющихся частью Петербурга (рис. 7, 8). Имеет место противоречие градостроительного развития территорий: низкая транспортная доступность и активно развивающаяся высокоплотная жилая застройка, в том числе исторических городских районах. К примеру, новые кварталы района проспекта Маршала Блюхера и активно строящийся район вдоль Советского проспекта (в районе Рыбацкое), двухполосная реконструкция которого планируется уже на протяжении почти полувека, страдают от хронического недостатка инфраструктуры.

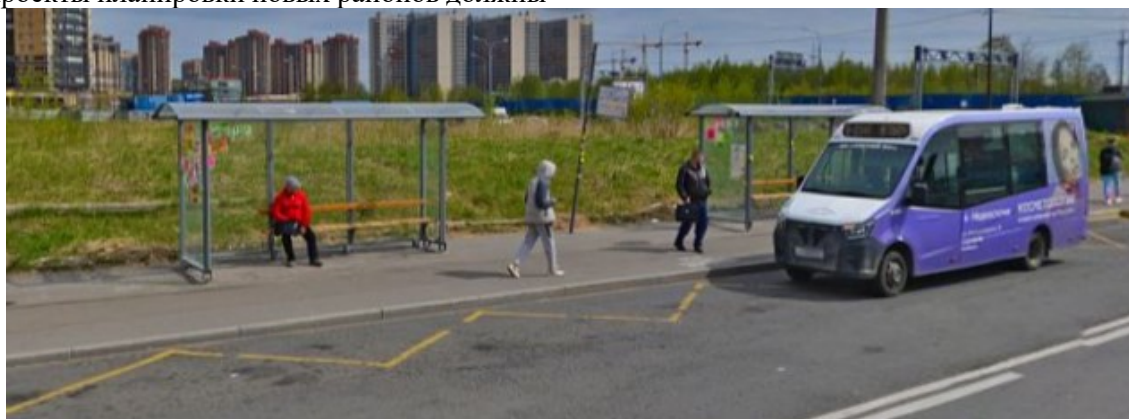


Рис. 7. Зона остановки с большой протяженностью



Рис. 8. Зона остановки без павильона

Подход типового проектирования зон остановок в Санкт-Петербурге малопригоден в связи с разной плотностью населения городских районов, их разнообразной планировкой, а также наличием больших расстояний между отдельными городами – планировочными районами Санкт-Петербурга (Кронштадт, Ломоносов,

Пушкин, Петергоф) (рис. 9). Также размещение типовых павильонов остановок затруднено из-за ограничений, связанных с охраной внешнего вида объектов культурного наследия, достопримечательных мест исторического центра, культурных и исторических объектов (рис. 10).



Рис. 9. Зона остановки у съезда на кольцевую дорогу

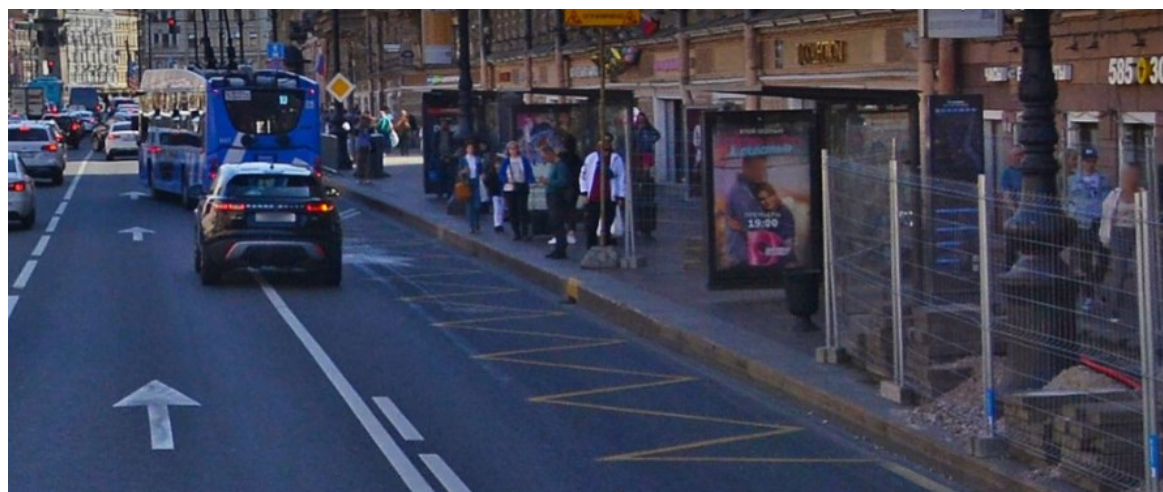


Рис. 10. Зона остановки в историческом центре

Применение модульного проектирования павильонов остановок общественного транспорта с большей вероятностью будет оправдано как для исторического центра, так и для спальных районов, промышленных зон и городов-сателлитов с большими расстояниями, поскольку

данный вид предполагает большую вариативность размещения остановок на конкретных магистралях, в различных районах города Санкт-Петербург.

В связи с вышеизложенным, предлагаются следующие принципы организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга:

Принцип компактности и интеллектуальности структуры отражает подходы проектирования зон остановки с учетом текущего планировочного решения, а также в рамках разрабатываемой концепции. Возможность разместить все необходимые объекты зоны остановки на минимально возможной площади станет приоритетной задачей в будущем. Это позволяет оптимизировать использование городской территории и снизить затраты на строительство и эксплуатацию остановок.

Интеллектуальность предполагает использование современных технологий и решений для контроля за работой остановочных пунктов. В рамках данного принципа могут рассматриваться системы информирования пассажиров о времени прибытия транспорта, системы оплаты проезда, а также системы освещения, видеонаблюдения, связи со службами спасения.

Принцип адаптивности и вариативности. В зависимости от видов проезда и загруженности дорог общего пользования, а также исторического контекста среды размещения, вариативность остановок наземного транспорта позволяет рассматривать различные варианты компоновки и конструкции имеющихся решений. Могут рассматриваться различные типы остановочных пунктов: стандартные остановки, экспресс-остановки, зоны пересадок на другие виды транспорта и т.д.

Принцип модульности предполагает разработку модулей с учетом различных планировочных условий для выполнения ряда функций с возможностью замены той или иной части для ремонта или обновления. Принцип модульности обеспечивает гибкость и удобство обслуживания транспортной системы.

В рамках представленной работы основной упор делается на принцип модульности. Авторами представлены компоновочные решения павильонов остановки наземного транспорта (рис. 11).



Рис. 11. Компоновочные решения павильонов

Представленные планы были сделаны с учётом рекомендации по размещению зоны остановки. Соблюдения данных правил позволяет создать комфортные условия для пользования инфраструктурой пассажирами. В зависимости от

ширины пешеходной зоны и нагрузки пассажиропотока предлагается несколько вариантов модульных павильонов. Благодаря модульному решению может меняться длина остановки, а также варьируется ширина в зависимости от ширины тротуара.

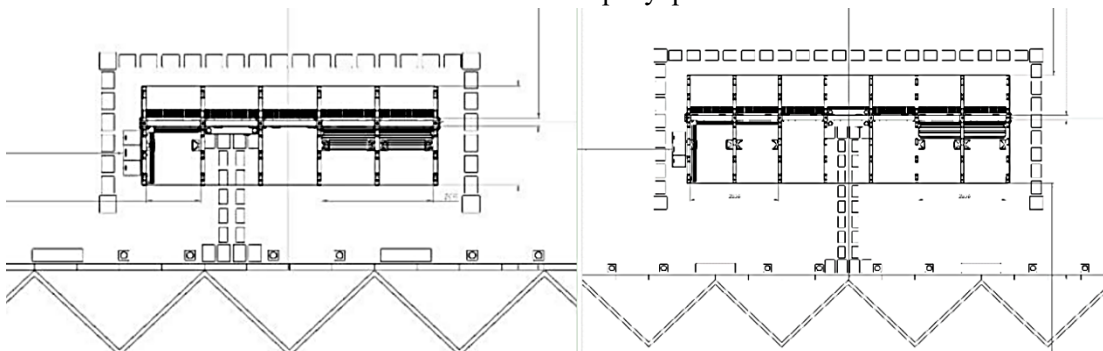


Рис. 12. Схема расположения павильонов

Выводы. Формирование зон остановок общественного транспорта должно происходить с учетом множества факторов, основным из которых является использование актуальных данных по текущей дорожной ситуации для обеспечения

комфортной городской среды. Для решения проблем на определенных участках улиц и дорог с расположением зон остановок стоит рассматривать различные варианты формообразования остановочных комплексов с целью снижения

риска для пассажиров и ускорения процесса посадки и высадки.

Определена новизна работы, которая заключается в исследовании принципов формирования зон остановок, а также в предложении применения модульного типа конструкции павильона. Рассмотрены варианты проездов и планирования зон остановок наземного транспорта, а также варианты компоновки павильонов остановок относительно дороги в зависимости от различных факторов.

На основе рассмотренных ситуаций предложены принципы организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга, а именно: принципы компактности и интеллектуальности структуры, адаптивности и вариативности, а также модульности. Это позволит разрабатывать зоны остановок с учетом изменчивости ситуации на дорогах, а также в рамках планирования городской среды.

Разработка павильонов остановки модульного типа позволит формировать соответствующие современным требованиям нестандартные варианты комбинации функционального наполнения, эргономически проработанных и наиболее удобные для пассажиров с учетом норм безопасности и комфорта, а также эстетически привлекательного внешнего вида. Представлена разработанная концепция модульного павильона остановки наземного транспорта.

Установлено, что многие зоны остановок в Санкт-Петербурге нуждаются в пересмотре и определении необходимого перечня компонентов, которые требуются в конкретном месте для лучшего функционирования пространства. Также определено, что стандартные решения в формировании зон остановок, а также остановочных павильонов зачастую не удовлетворяют всем необходимым требованиям стремительно расширяющегося и растущего городского пространства. Проведенное исследование ляжет в основу более детального изучения наиболее проблемных зон остановок транспорта и позволит сформировать оптимальное предложение по составлению павильона из модульных структур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванькина Н.А., Перькова М.В. Концепция нового урбанизма: предпосылки развития и основные положения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 75–84. DOI: 10.12737/article_5b6d585f08a625.50385604.
2. Шевцова В.В., Нагорная М.С. Стилистические тенденции проектирования навигационного пространства остановочных комплексов в городах России // Управление в современных системах. 2020. № 1 (25). С. 76–88.
3. Касаткина Л.А., Попова И.А., Удина И.Л. Организация остановок общественного транспорта на примере Красноярска // Культурные ландшафты городов Сибири (аксиология, история, практики). Материалы X Всероссийского научного симпозиума «Проблемы культуры городов России». Омск, 30 сентября 2020 г. 2021. С. 325.
4. Николаева Р.В., Ибрагимова А.А. Аспекты и требования пространственного решения трамвайной остановки // Техника и технология транспорта. 2021. № 1. С. 11.
5. Шаповалова Ю.С. Применение интеллектуальных транспортных систем на базе ГЛОНАСС на общественном транспорте // Вестник магистратуры. 2019. № 7-2 (94). С. 56–58.
6. Завьялова А.В. Анализ государственной политики в сфере транспорта Санкт-Петербурга // Столыпинский вестник. 2023. Т. 5. № 1. С. 354–364.
7. Смирнова А.Ю., Перькова М.В., Боровской А.Е. Формирование моделей транспортно-пересадочных узлов в системе городского пассажирского транспорта на территории г. Белгорода // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 8. С. 86–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-86-97.
8. Видясова Л.А., Тензина Я.Д., Видясов Е.Ю. Восприятие концепции «умного города» активными горожанами в Петербурге // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2018. Т. 11. № 4. С. 404–419.
9. Анциферов Б.И., Довбыш В.О., Огай В.А. Проблемы проектирования остановочных пунктов пассажирского маршрутного транспорта в населённых пунктах // Организация и безопасность дорожного движения : Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, Тюмень, 12 марта 2015 года. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. С. 32–36.
10. Березинец И.В., Соколова Е.В. Транспортная система и город: какой должна быть транспортная реформа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2020. Т. 19. № 3. С. 362–384.
11. Родионов В.А., Говорухин В.П., Нестерчук А.А. Транспортная реформа в Санкт-Петербурге: предпосылки, цели, задачи, основные направления. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. 110 с.
12. Phillips R.O., Hagen O.H., Berge S.H. Bus stop design and traffic safety: An explorative analysis // Accident Analysis & Prevention. 2021. Vol. 153. № 105917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105917>.

13. Чикалина С.Л., Елфимова Н.А. Проблема безопасности дорожного движения в зонах расположения трамвайных остановок // Молодой исследователь: вызовы и перспективы : Сборник статей по материалам LI международной научно-практической конференции. Том 26 (51) : Общество с ограниченной ответственностью «Интернаука», 2017. С. 228–233.

14. Чепель А.И. Автомобиль против трамвая: проблемы дорожного движения в Санкт-Петербурге в начале XX века // Россия и мир в исторической ретроспективе : Материалы XXIX международной научной конференции, к 320-летию основания Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, 07 апреля 2023 года. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. С. 488–492.

15. Зубкова Е.В., Сапрыкин О.Н. Эволюционный подход к повышению пешеходной доступности остановок общественного транспорта // Международная молодёжная научная конференция «XV королевские чтения», посвящённая 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова : тезисы докладов, Самара, 08–10 октября 2019 года. Том 1. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. С. 209–210.

16. Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования. ГОСТ Р 52766-2007. - Доступ из справ.-прав. системы «Консультант плюс». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://pravo.edu-site.ru/GOST-P-52766-2007.pdf> (дата обращения 04.03.2024).

17. Приказ Министерства регионального развития РФ от 29.12.2011 № 635/9 "Об утверждении свода правил "СНиП 21-02-99* "Стоянки автомобилей""// СПС «КонсультантПлюс». [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL:

https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minregiona-Rossii-ot-29.12.2011-N-635_9/ (дата обращения 04.03.2024)

18. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001. М.: Минстрой России, 2020. 69 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf?ysclid=ltevcvpcv971110506223> (дата обращения 04.03.2024)

19. Fearnley N., Krogstad J.R., 2017. God samfunnsøkonomi å forsinke bilister. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://samferdsel.toi.no/meninger/god-samfunnsokonomia-forsinke-bilister-article33797-677.html>. (дата обращения 04.03.2024)

20. Pan Y., Chen S., Li T., Niu S., Tang K. Exploring spatial variation of the bus stop influence zone with multi-source data: A case study in Zhenjiang, China // Journal of Transport Geography. 2019. Т. 76. С. 166–177.

21. Authority G.C.R.T. Bus Stop Design Guidelines // Update. 2007. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.go-metro.com/uploads/Transit%20Infrastructure%20Fund/BUS%20STOPS%20GUIDELINES%20v6.1.pdf> (дата обращения: 04.03.2024)

22. LONDON M. O. F. Accessible bus stop design guidance. – 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.steyningpc.gov.uk/wp-content/uploads/2011/08/TfL-accessible-bus-stop-design-guidance.pdf> (дата обращения: 04.03.2024)

23. Liu X., Yang Y., Meng M., Rau A. Impact of different bus stop designs on bus operating time components // Journal of Public Transportation. 2017. Т. 20. № 1. С. 104–118.

Информация об авторах

Аслямов Айрат Ахатович, доцент Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: irat_a@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Щур Семен Юрьевич, доцент Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: semmyon@yandex.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Зубов Андрей Гендрихович, доцент Высшей школы дизайна и архитектуры. E-mail: zybov61@mail.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 29.02.2024 г.

© Аслямов А.А., Щур С.Ю., Зубов А.Г., 2025

Aslyamov I.A., *Shchur S.Y., Zubov A.G.
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
**E-mail: semmyon@yandex.ru*

PRINCIPLES FOR ORGANIZING STOP ZONES FOR GROUND PUBLIC TRANSPORT IN ST. PETERSBURG

Abstract. *The work is devoted to the design and operation of ground transport stop zones. The principles of the organization of zones of stops of ground public transport of St. Petersburg are formulated. The main issues of the design of bus shelters are considered. The list of necessary equipment and elements of the stop zone for the correct operation of public transport has been determined. The purpose of the work is to formulate and define the basic principles of the organization of ground public transport stop zones in St. Petersburg. The research method is based on the analysis of scientific and technical literature on the peculiarities of the creation and operation of ground transport stop zones. The methods of forming these zones and equipping them with the necessary equipment are being studied. The method of photofixation is used to analyze and identify the shortcomings of existing solutions. The paper analyzes aspects of the formation and development of the transport infrastructure of St. Petersburg and other cities with millions of inhabitants in order to identify problems during operation and issues related to their design for safe and comfortable operating conditions. The principles of formation of ground transport stop zones are investigated as a basis for searching and solving problems of optimal functioning and safe operation. It is determined that the design and appearance of the bus shelter can improve the safety and comfort of people waiting for their transport, as well as speed up the process of boarding and disembarking passengers from arriving vehicles. The main problem of the placement of bus shelters has been identified. The issue of design features of standard solutions for various districts of the city is also considered. The basic principles of the organization of ground transport stop zones are formulated. A modular design of the bus shelter is proposed.*

Keywords: *stop zone, transport infrastructure, bus shelter, sustainable development, urbanism*

REFERENCES

1. Ivankina N.A., Perkova M.V. New urbanism movement: prerequisites of evolution and basic planning models [Koncepcia novogo urbanizma: predposylki razvitiya i osnovny'e polozheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018. No. 8. Pp. 75–84. DOI: 10.12737/article_5b6d585f08a625.50385604 (rus)
2. Shevtsova V.V., Nagornaya M.S. Stylistic trends in the design of the navigation space of bus shelters in Russian cities [Stilisticheskiye tendenzii proyektirovaniya navigatsionn]. Management in modern systems. 2020. No. 1 (25). Pp. 76–88. (rus)
3. Kasatkina L.A., Popova I.A., Yudina I.L. Organization of public transport stops on the example of Krasnoyarsk [Organizatsiya ostanovok obshchestvennogo transporta na primere Krasnoyarska]. Cultural landscapes of Siberian cities (axiology, history, practices). Materials of the X All-Russian scientific Symposium «Problems of culture of Russian cities». Omsk, September 30, 2020–2021. P. 325. (rus)
4. Nikolaeva R.V., Ibragimova A.A. Aspects and requirements of the spatial solution of a tram stop [Aspekty i trebovaniya prostranstvennogo resheniya tramvaynoy ostanovki]. Technique and technology of transport. 2021. No. 1. Pp. 11. (rus)
5. Shapovalova Yu.S. Application of intelligent transport systems based on GLONASS on public transport. [Primeneniye intellektual'nykh transportnykh sistem na baze GLONASS na obshchestvennom transporte] Bulletin of the magistracy. 2019. No. 7-2 (94). Pp. 56–58. (rus)
6. Zavyalova A.V. Analysis of state policy in the field of transport in st. petersburg. [Analiz gosudarstvennoy politiki v sphere transporta Sankt-Peterburga] Stolypinsky Vestnik. 2023. Vol. 5. No. 1. Pp. 354–364. (rus)
7. Smirnova A.Y., Perkova M.V., Borovskoy A.E. Formation of models of transport and interchange hubs in the system of urban passenger transport on the territory of Belgorod. [Formirovaniye modeley transportno-peresadochnykh uzlov v sisteme gorodskogo passazhirskogo transporta na territorii g. Belgoroda]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 8. Pp. 86–97. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-86-97 (rus)
8. Vidasova L.A., Tensina I.A., Vidasov E.Yu. Perception of the «Smart City» concept by active citizens in St. Petersburg. [Vospriyatiye koncepcii «umnogo goroda» aktivnymi gorozhanami v Peterburge] Vestnik of Saint Petersburg University. Sociology. 2018. Vol. 11, issue 4. Pp. 404–419. <https://doi.org/10.21638/spbu12.2018.402> (rus)
9. Antsiferov B.I., Dovbysh V.O., Ogai V.A. Problems of designing stopping points for passenger route transport in populated areas. [Problemy proyektirovaniya ostanovochnykh punktov passazhirskogo marshrutnogo transporta v naselennykh punktakh]. Organization and safety of road traffic : Materials of the VIII All-Russian Scientific and

Practical conference, Tyumen, March 12, 2015. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University, 2015. Pp. 32–36. (rus)

10. Berezinets I.V., Sokolova E.V. Transport system and the city: what should be the transport reform. [Transportnaya sistema i gorod: kakoj dolzhna byt' transportnaya reforma]. Bulletin of St. Petersburg University. Management. 2020. Vol. 19. No. 3. Pp. 362–384. (rus)

11. Rodionov V.A., Govorukhin V.P., Nesterchuk A.A. Transport reform in St. Petersburg: prerequisites, goals, tasks, main directions. [Transportnaya reforma v Sankt-Peterburge: predposylki, celi, zadachi, osnovny'e napravleniya]. St. Petersburg : St. Petersburg State University of Economics, 2021. 110 p. (rus)

12. Phillips R.O., Hagen O.H., Berge S.H. Bus stop design and traffic safety: An explorative analysis. Accident Analysis & Prevention. 2021. Vol. 153. No. 105917. DOI: 10.1016/j.aap.2020.105917.

13. Chikalina S.L., Elkhimova N.A. The problem of road safety in the area of operation of the ramway park. [Problema bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v zona'x raspolozheniya tramvayny'x ostanovok]. Young researcher: conclusions and recommendations : A collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference.: 2017. Vol. 26 (51). Pp. 228–233. (rus)

14. Chepel A.I. A car against a tram: problems of traffic in St. Petersburg at the beginning of the XX century. [Avtomobil' protiv tramvaya: problemy dorozhnogo dvizheniya v Sankt-Peterburge v nachale XX veka]. Russia and the world in historical retrospect : Proceedings of the XXIX International Scientific conference, to the 320th anniversary of the founding of St. Petersburg, St. Petersburg, April 07, 2023. Vol. 1. – St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2023. Pp. 488–492. (rus)

15. Zubkova E.V., Saprykin O.N. An evolutionary approach to improving pedestrian accessibility of public transport stops [Evolucionnyj podhod k povysheniyu peshehodnoj dostupnosti ostanovok obshchestvennogo transporta]. Youth International Scientific Conference "XV Royal Readings" dedicated to the 100th anniversary of the birth of D.I. Kozlov : abstracts, Samara, October 08-10, 2019. Vol. 1. Samara: ANO «SNC Publishing House», 2019. Pp. 209–210. (rus)

Information about the authors

Aslyamov, Irat A. Assistant professor. E-mail: irat_a@mail.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Shchur, Semyon Y. Assistant professor. E-mail: semmyon@yandex.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

16. Public roads. Elements of the arrangement. General requirements [Electronic resource]: GOST R 52766-2007. Access from Consultant Plus systems. Access mode: URL: <https://pravo.edu-site.ru/GOST-P-52766-2007.pdf> (accessed: 04.03.2024)

17. Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated 12/29/2011 No. 635/9 "On approval of the code of rules "SNiP 21-02-99* "Parking". SPS "ConsultantPlus". Access mode: URL: https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minregiona-Rossii-ot-29.12.2011-N-635_9/ (accessed: 04.03.2024)

18. SP 59.13330.2020. Accessibility of buildings and structures for people with limited mobility. Updated version of SNiP 35-01-2001. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2020. 69 p. Access mode: URL: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf?ysclid=ltcvpcv971110506223> (accessed: 04.03.2024)

19. Fearnley N., Krogstad J.R., 2017. God samfunnseconomi and forsinke bilister. [Electronic resource] Access mode: URL: <https://samferdsel.toi.no/meninger/god-samfunnsokonomia-forsinke-bilister-article33797-677.html> (accessed: 04.03.2024).

20. Pan Y., Chen S., Li T., Niu S., Tang K. Exploring spatial variation of the bus stop influence zone with multi-source data: A case study in Zhejiang, China. Journal of Transport Geography. 2019. Vol. 76. Pp. 166–177.

21. Authority G.C.R.T. Bus Stop Design Guidelines. Update. 2007. [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.go-metro.com/uploads/Transit%20Infrastructure%20Fund/BUS%20STOPS%20GUIDELINES%20v6.1.pdf> (accessed: 04.03.2024)

22. London M.O.F. Accessible bus stop design guidance. 2006. [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://www.steyningpc.gov.uk/wp-content/uploads/2011/08/TfL-accessible-bus-stop-design-guidance.pdf> (accessed: 04.03.2024)

23. Liu X., Yang Y., Meng M., Rau A. Impact of different bus stop designs on bus operating time components. Journal of Public Transportation. 2017. Vol. 20. No. 1. Pp. 104–118.

Zubov, Andrei G. Assistant professor. E-mail: zybov61@mail.ru. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29.

Received 29.02.2024

Для цитирования:

Аслямов А.А., Щур С.Ю., Зубов А.Г. Принципы организации зон остановок наземного общественного транспорта Санкт-Петербурга // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 82–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-82-94

For citation:

Aslyamov I.A., Shchur S.Y., Zubov A.G. Principles for organizing stop zones for ground public transport in St. Petersburg. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 82–94. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-82-94

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-95-106

**Трубицын М.А., Воловичева Н.А, Лисняк В.В., Бондарева И.А., Морозова Н.А.,
Тарасов И.А.*

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

**E-mail: troubitsin@bsu.edu.ru*

ОЦЕНКА ДЕФЛОКУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИСПЕРСАНТОВ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования возможности использования фотометрического метода для оценки эффективности дефлокулянтов различной химической природы. В качестве модельных систем использованы водные суспензии порошков реактивного глинозема различной дисперсности с добавкой поликарбоксилатного эфира в диапазоне концентраций от 0,05 до 0,50 мас. %. Массовая доля твердой фазы для концентрированных суспензий составляла 80 %, для разбавленных суспензий – 0,1 %. Для выявления целесообразности применения современных дисперсантов и их оптимальной концентрации разработана и апробирована фотометрическая методика оценки их дефлокулирующей активности. За основу предлагаемого нового подхода взята существующая фотометрическая методика определения мутности воды. С помощью математического анализа кинетических кривых изменения мутности 0,1 %-ных водных суспензий с использованием уравнения седиментации Стокса рассчитаны эквивалентный диаметр агрегатов частиц в случае не полностью дефлокулированных суспензий и размер отдельных частиц для полностью дефлокулированных систем. Универсальность и эффективность разработанной методики была также апробирована в отношении дефлокулянта триполифосфата натрия. Полученные данные по влиянию концентрации дефлокулянта на кинетические зависимости изменения мутности 0,1 %-ых водных суспензий глинозема были подтверждены результатами, полученными при определении текучести концентрированных водных суспензий.

Ключевые слова: дефлокуляция, минеральные порошки, дисперсанты, водные суспензии, реактивный глинозем, мутность, седиментация, фотометрия

Введение. Суспензии на основе высокодисперсных корундовых порошков находят широкое применение в производстве технической и специальной корундовой керамики, а также как ключевой компонент матричных систем в технологии низкоцементных огнеупорных литевых масс. Основным требованием, предъявляемым к таким суспензиям, является обеспечение низкой вязкости и оптимального реологического типа течения при высоком содержании твердой фазы наряду с агрегативной и седиментационной устойчивостью.

Важнейшим инструментом, обеспечивающим достижение хороших реотехнологических характеристик суспензий, является использование эффективных дефлокулянтов. В технологии приготовления минеральных суспензий, в том числе корундового состава, применяют достаточно широкий спектр различных дисперсантов, в числе которых в настоящее время используются, прежде всего, полифосфаты [1], полиакрилаты [2, 3-6], поликарбоксилатные эфиры (ПКЭ) [2-5] и их комбинации. В ряду полифосфатов наиболее распространенными являются гексаметафосфат натрия (ГМФ) $\text{Na}_6[(\text{PO}_3)_6]$ и триполифосфат натрия (ТПФ) $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$.

Известны различные методологические подходы к оценке эффективности диспергаторов, которые в основном базируются на анализе кривых реологического течения, получаемых при помощи реометров разного типа, а также приборов для измерения ζ -потенциала. Использование таких методологических подходов является, по мнению авторов, достаточно трудоемким, продолжительным по времени и требующим использования дорогостоящего специализированного оборудования.

В настоящее время для изучения и контроля процессов коагуляции водных суспензий успешно применяют фотометрические методы, с помощью которых определяют размер, форму и структуру коллоидных частиц. Для определения порога коагуляции широко используется нефелометрический метод. В процессе образования агрегатов частиц изменяются индикатрисы светорассеяния, определяемые методами статического рассеяния, а также автокорреляционные функции интенсивности рассеянного света, определяемые методами динамического светорассеяния [6]. Также отмечается, что для более детальных исследований коагуляции эффективен метод, осно-

ванный на одновременном изучении статического и динамического светорассеяния [6–10]. В работе [11] продемонстрирована возможность применения электрооптического метода при изучении коагуляции жидких нанодисперсных систем, в частности, коллоидов и суспензий. Авторами использованы два электрооптических эффекта: зависящий и не зависящий от поляризации света, проходящего сквозь систему в электрическом поле. Показано, что определенные электрооптическим методом зависимости концентрации частиц от времени коагуляции в изoeлектрической точке хорошо согласуются с теорией быстрой коагуляции Смолуховского.

Как было обозначено выше, образование агрегатов из частиц в дисперсных системах меняет их оптические свойства, такие как мутность, индикатриса светорассеяния, показатель преломления. Известна методика определения мутности воды согласно ГОСТ Р 57164-2016 [12], основанная либо на регистрации рассеянного излучения, возникающего при прохождении излучения в видимой или ближней инфракрасной области спектра через пробу воды, содержащей взвешенные частицы (нефелометрический метод), либо на регистрации ослабления излучения, проходящего через пробу воды, содержащей взвеси (турбидиметрический метод). Интенсивность рассеянного

излучения зависит от длины волны падающего излучения, угла измерения, формы, оптических характеристик и гранулометрического состава частиц, взвешенных в воде. Вместе с тем, использование фотометрических методов определения мутности для оценки действия различных дефлокулянтов в минеральных суспензиях является малоизученным.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности использования фотометрического метода для оценки эффективности дефлокулянтов различной химической природы на примере высокоглиноземистых водных суспензий.

Материалы и методы. В настоящей работе для приготовления модельных водных суспензий использовали порошки реактивного глинозема различной дисперсности (индексы образцов РГ0 и РГ1). Порошковые материалы получены методом сухого помола без присутствия добавок (образец РГ0) и в присутствии интенсификатора – полиэтиленгликоля (ПЭГ) в количестве 0,05 масс. % (образец РГ1) [13]. Минералогический состав обоих образцов представлен кристаллической фазой $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (не менее 98 масс. %), химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав порошков глинозема, мас. %

Образец	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$
РГ0	99,57	0,02	0,03	0,02	-	0,10
РГ1	99,61	0,02	0,03	0,02	-	0,10

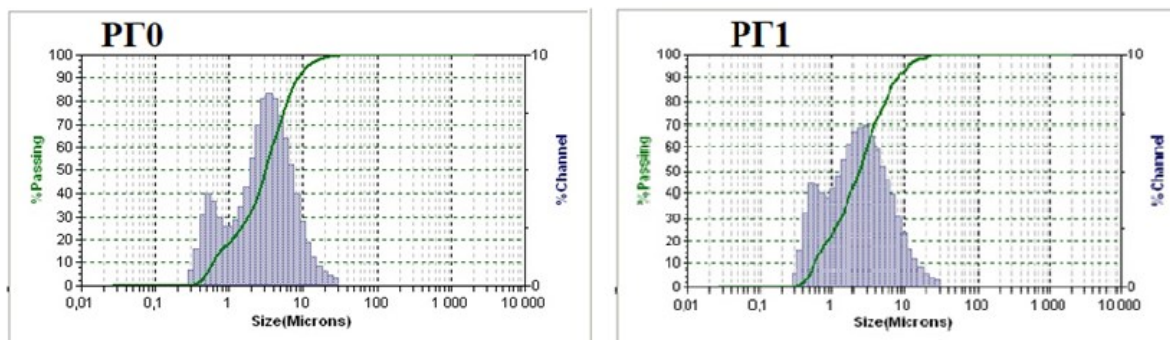
Гранулометрический состав экспериментальных порошков определяли методом лазерной дифракции с помощью анализатора «Microtrac S3500» (США). В качестве дисперсионной среды

при исследовании использовали дистиллированную воду. Перед измерением проводили ультразвуковое диспергирование пробы в дисперсионной среде в течение 30 с. Гранулометрический состав представлен в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2

Гранулометрический состав экспериментальных порошков глинозема

Образец	D_{20} , мкм	D_{50} , мкм	D_{90} , мкм	Фракция < 1 мкм, %
РГ0	1,07	2,87	8,49	20,8
РГ1	0,88	2,40	8,05	24,7

Рис. 1. Интегральные кривые и гистограммы распределения частиц в порошках $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Анализ рисунка 1 показал, что оба экспериментальных порошка глинозема имеют бимодальный характер распределения частиц. Максимум первой моды для исследованных образцов располагается в области 0,5–0,6 мкм, а расположение максимума второй моды фиксируется в интервале 2,0–3,0 мкм. Важным отличием образца РГ1 является более высокое (на 4,7% выше) содержание субмикронной фракции, по сравнению с РГ0 (табл. 2).

Для детального изучения структурно-морфологических особенностей порошков использовали метод сканирующей электронной микроскопии с использованием растрового электронного микроскопа Hitachi SU1510 (Япония). Изображения, представленные на рис. 2, получали с использованием детектора вторичных электронов. Съемку проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ в условиях низкого вакуума (6–270 кПа). Максимальное разрешение – 4 нм.

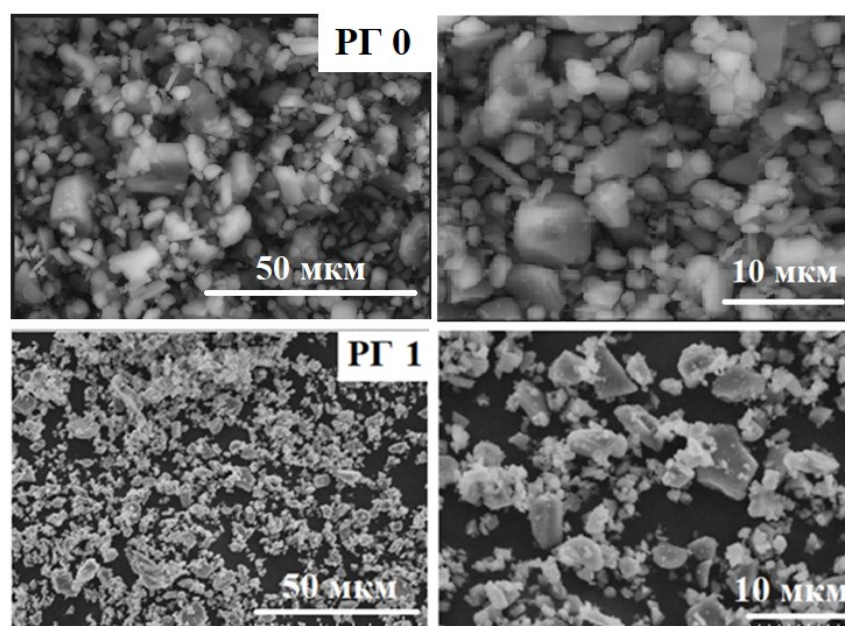


Рис. 2. СЭМ-изображения экспериментальных высокодисперсных корундовых порошков

При анализе микрофотографий установлено, что микроструктура глиноземистых порошковых продуктов сформирована дезагрегированными зернами $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Для образцов РГ0 и РГ1 характерна четкая дифференциация частиц на 2 типа. Первую группу формируют сравнительно крупные беспористые кристаллы неправильной остроугольной формы размером от 2 до 5 мкм. Ко второму типу можно отнести округлые пластинчатые зерна размером до 1,5 мкм.

В качестве экспериментальных дефлокулянтов при приготовлении суспензий использовали добавки на основе поликарбоксилатного эфира (ПКЭ) марки Синтефлоу ДМ50 (Синтез ОКА, Россия) и триполифосфат натрия (ТПФ).

Реологические свойства водных глиноземистых суспензий оценивали по величине текучести, которую определяли как время истечения 100 мл суспензии на вискозиметре Энглера с выходным отверстием 5,4 мм. Перед испытанием суспензию перемешивали стеклянной палочкой, переливали в сосуд вискозиметра и выдерживали в состоянии покоя в течение 30 с. После этого открывали выпускное отверстие и по секундомеру фиксировали время истечения 100 мл суспензии

– τ_0 . Выполняли не менее трех параллельных измерений. Аналогичные испытания проводили для суспензии после выдержки в вискозиметре в течение 30 мин и определяли вторую текучесть τ_{30} . Также по результатам определений текучести рассчитывали коэффициент загустевания (КЗ), равный отношению τ_{30}/τ_0 , который характеризует склонность суспензии к коагуляционному структурообразованию.

Величину мутности (в формазиновых единицах) разбавленных водных суспензий определяли с помощью УФ-спектрофотометра DR 6000 (HACH, США) в автоматическом режиме по стандартной методике, встроенной в прибор. Длина волны составляла 860 нм, кювета – 50 мм.

Основная часть. Для выявления целесообразности применения современных дисперсантов и их оптимальной концентрации нами была разработана и апробирована фотометрическая методика оценки их дефлокулирующей активности. За основу предлагаемых новых подходов взята существующая фотометрическая методика определения мутности воды [12].

На первом этапе экспериментальной работы была приготовлена серия модельных водных сус-

пензий на основе порошка глинозема РГ1 с добавкой поликарбоксилатного эфира различной концентрации. В настоящей работе дозировка ПКЭ составляла: 0,05 (С005); 0,26 (С026); 0,33 (С033) и 0,50 (С05) мас.%, влажность суспензий во всех случаях – 20%. Выбор указанных концентраций ПКЭ основан на экспериментальных результатах, представленных нами в работе [14]. Суспензии готовили следующим образом. Навески порошков, рассчитанные с учетом получения объема суспензии не менее 150 см³, переносили в пластиковый стакан и перемешивали в течение 1 мин. Далее добавляли требуемое количество дистиллированной воды с растворенным поликарбоксилатным эфиром (ПКЭ) и перемешивали при помощи ручного миксера 3 мин до получения гомогенной суспензии. Также были приготовлены две контрольные суспензии: К0 – с использованием порошка РГ0 без добавки ПКЭ; К1 – с использованием порошка РГ1 без добавки ПКЭ.

Седиментация твердых частиц суспензии происходит под действием сил тяжести, чему препятствует вязкость дисперсионной среды, действующая в обратном направлении [14, 15]. При достижении равновесия этих двух составляющих твердые частицы одинакового размера начинают перемещаться с постоянной скоростью, и скорость их седиментации в этом случае описывается уравнением Стокса (1):

$$v = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)d^2}{18\eta}, \quad (1)$$

где η – вязкость среды; v – скорость движения частицы d – диаметр частицы, ρ_2 – плотность частицы; ρ_1 – плотность среды; g – ускорение силы тяжести. Однако использование данного уравнения возможно при соблюдении условий применения закона Стокса к изучаемой системе:

- скорость оседания частицы должна быть постоянной. Это условие практически соблюдается для частиц размером от 0,1 до 100 мкм;
- частицы должны быть твердыми и иметь сферичную форму;
- суспензии должны быть мало концентрированными (ω твердой фазы – менее 1%) с целью минимизации межчастичного взаимодействия;
- осаждение частиц должно проходить в ламинарном режиме.

С учетом выполнения вышеуказанных требований для использования закона Стокса в методике, приготовленные концентрированные суспензии разбавляли дистиллированной водой до содержания твердой фазы 0,1%. В полученных системах определяли величину мутности через определенные промежутки времени.

В используемом приборе (фотометр DR 6000 (НАСН)) размер сечения выходного отверстия составляет 10×10 мм. Таким образом, световой поток, проходящий через измерительную кювету, будет иметь аналогичные размеры (рис. 3).

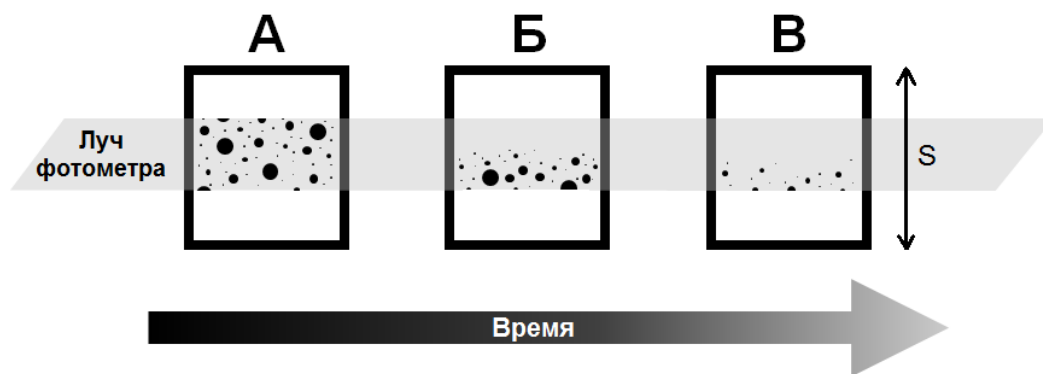


Рис. 3. Схематическое изображение процесса измерения мутности водных глиноземистых суспензий

В данном случае процесс измерения мутности будет возможен только при условии нахождения дисперсных частиц глинозема в поле проходящего светового потока. В момент начала измерения мутности фронт движущихся частиц будет соответствовать верхней границе светового потока (рис. 3А). Далее величина мутности начинает снижаться за счет постепенного осаждения частиц (рис. 3Б), а окончание фиксации изменения мутности будет соответствовать нижней границе фронта частиц (рис. 3В). Отсюда следует, что трек перемещения частиц дисперсной фазы S , когда возможна их фиксация в режиме мутности,

составляет 10 мм. После этого процесс седиментации происходит ниже границы светового потока и поэтому величина мутности не может быть зафиксирована. Полученные кривые изменения величины мутности представлены на рис. 4.

Выявлено, что для суспензии К0 наблюдается наиболее быстрое снижение величины мутности. Об этом свидетельствует резкий ниспадающий ход кривой, особенно, в первые 15 минут эксперимента. По мнению авторов, это связано с агрегацией высокодисперсных частиц твердой фазы, что, в свою очередь, приводит к образованию более крупных флокулов, оседающих с большей скоростью.

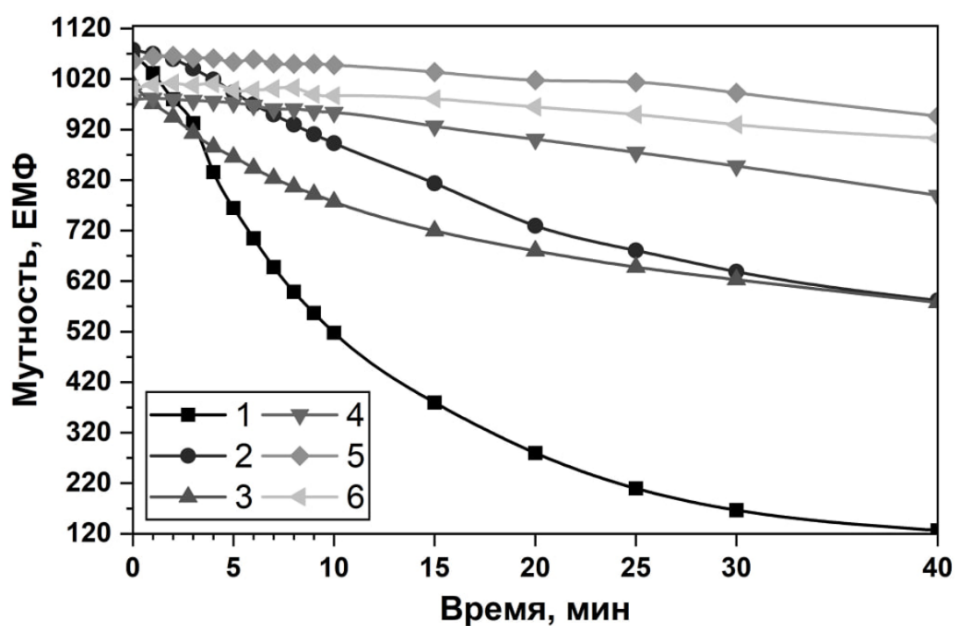


Рис. 4. Кинетические зависимости изменения величины мутности 0,1 % водных суспензий глинозема: 1 – K0; 2 – K1; 3 – C005; 4 – C026; 5 – C033 и 6 – C05

Также установлено, что интенсификатор ПЭГ, вводимый при помоле корунда, оказывает определенное дефлокулирующее действие и повышает седиментационную устойчивость водных суспензий (кривая K1). Дополнительное введение в водную суспензию РГ1 дисперсанта ПКЭ в количестве 0,05 % (кривая C005) не оказывает существенного дефлокулирующего действия и практически не влияет на седиментационную устойчивость суспензии. Это хорошо заметно при анализе хода кривых K1 и C005, который практически идентичен. Данный факт объясняется тем, что количества макромолекул введенного ПКЭ недостаточно для формирования стерической оболочки, а дезагрегация высокодисперсных зерен глинозема обусловлена, в большей степени, молекулами ПЭГ, которые адсорбировались на частицы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в процессе помола.

Увеличение концентрации ПКЭ в суспензии до 0,26 % (C026) существенно замедляет скорость осаждения частиц твердой фазы, о чем свидетельствует плавный ход кривой снижения мутности. Для полностью дефлокулированных суспензий (C033 и C05) величина мутности изменяется крайне медленно, ход кинетических кривых практически параллелен оси абсцисс.

На полученных кривых можно выделить участки, которые носят практически линейный характер. То есть, могут быть линеаризованы посредством уравнения прямолинейной графической зависимости. На основе сопоставительного анализа данных рисунка 4 можно выделить кривые, которые имеют близкий характер изменения мутности с течением времени. Поэтому далее кинетические зависимости мутности исследуемых

суспензий были сгруппированы по данному признаку (рис. 5).

На кривых выделены отрезки AB, максимально отвечающие линейной зависимости. Далее каждый линейный участок был описан уравнением прямой, исходя из критерия, что коэффициент аппроксимации R^2 соответствует условию $R^2 \geq 0,96$. Выбранный участок описывали уравнением прямой вида $y=kx+b$. Физический смысл коэффициента k в уравнении – скорость изменения мутности. В свою очередь, скорость изменения мутности, в данном случае, прямо пропорциональна скорости седиментации частиц глинозема, которая согласно уравнению Стокса, определяется их плотностью и размером (ρ и d). В данном исследовании плотность твердой фазы является величиной постоянной, а варьируется только средний эквивалентный размер частиц как следствие их агломерации.

В полностью дефлокулированных суспензиях РГ1 присутствуют частицы с эквивалентным диаметром, соответствующим первой и второй модам (0,5 и 2,8 мкм). Скорость осаждения $v_{теор}$, рассчитанная по уравнению Стокса, для частиц первой моды – 0,05 мм/мин; для второй моды – 1,5 мм/мин. Реальное значение скорости седиментации v_p находили с учетом фактора формы для округлых частиц равного 0,7 из выражения $v_p = 0,7 \cdot v_{теор}$. Таким образом, v_p для частиц первой моды составляет 0,035 мм/мин, а второй моды – 1,05 мм/мин. Соответственно, расчетное время прохождения измерительного трека S из выражения $\tau = S/v_p$ частицами 1 моды равно 286 мин., а 2 моды – 9,5 мин.

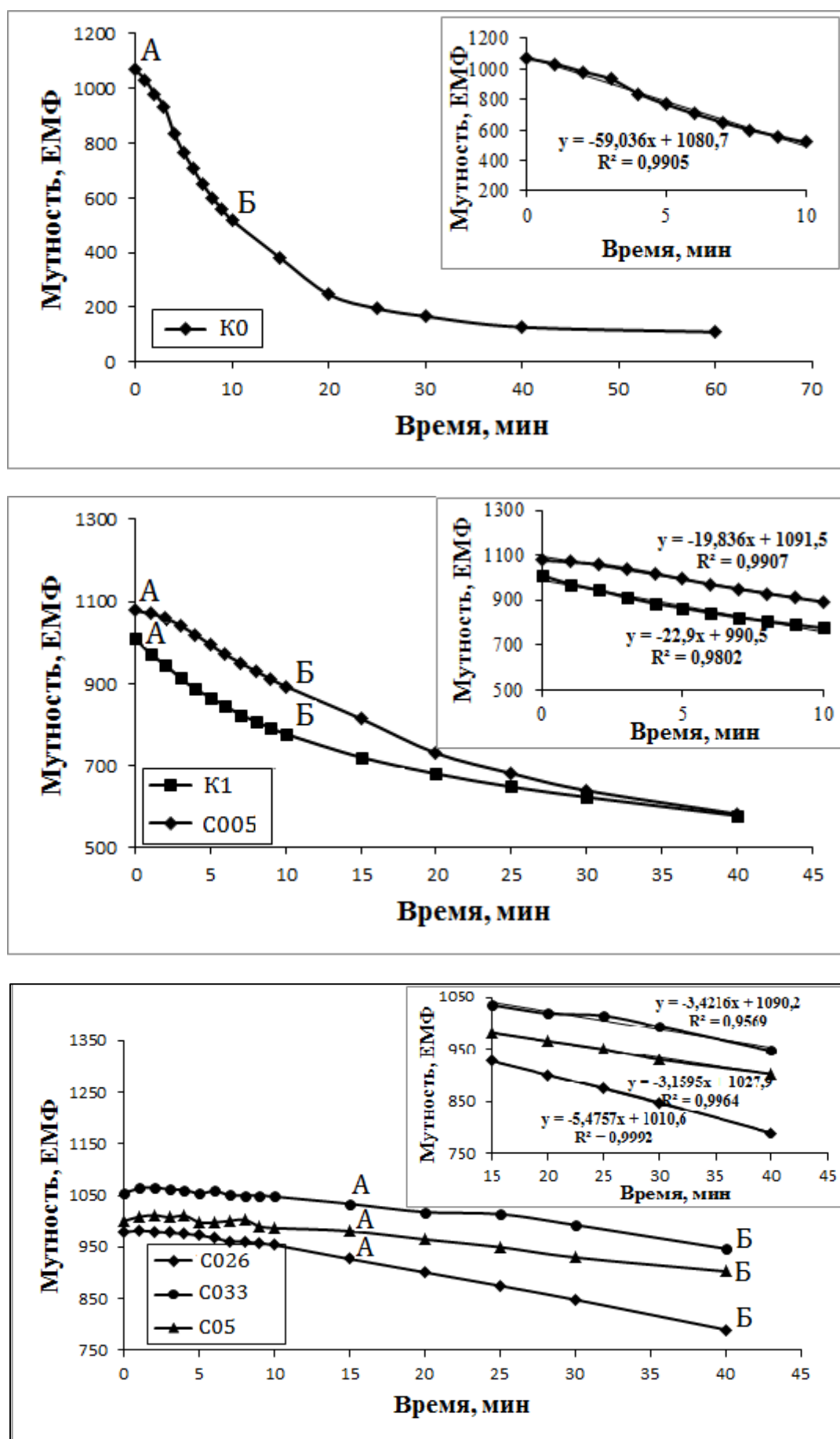


Рис. 5. Линеаризованные кинетические зависимости изменения величины мутности суспензий глинозема

При дальнейших расчетах исходили из наличия прямопропорциональной зависимости между скоростью изменения мутности (v_m) и скоростью седиментации (v_c) для одного типа частиц, т.е. $v_m = a \cdot v_c$, где a – коэффициент пропорциональности.

Поскольку размер частиц в дефлокулированной суспензии известен, то справедливо будет следующее соотношение:

$$\frac{v_{ca}}{v_{cd}} = \frac{v_{ma}}{v_{md}} = \frac{d_a^2}{d_d^2} \quad (2)$$

где d_a – эквивалентный диаметр агрегированных частиц в недефлокулированной суспензии, d_d^2 – эквивалентный диаметр дефлокулированных частиц, а v_{ca} , v_{ma} и v_{cd} , v_{md} – скорости изменения седиментации и мутности для агрегированных и дефлокулированных частиц, соответственно.

Отсюда эквивалентный диаметр агрегатов в недефлокулированной суспензии будет равен

$$d_a = \sqrt{\frac{v_{ma}}{v_{md}} \cdot d_d^2} \quad (3)$$

Пример расчета эквивалентного диаметра агрегатов для суспензии, которая была пригото-

влена на основе порошка РГ0 без введения дефлокулирующих добавок как при помоле, так и при приготовлении суспензии (К0) приведен ниже.

Исходя из коэффициента k в уравнении прямой, v_{ma} для этой суспензии равно 59,036 ЕМФ/мин.

Скорость изменения мутности v_{md} для моды 0,5 мкм в полностью дефлокулированной суспензии равна 3,159 ЕМФ/мин.

Тогда отношение скоростей равно 18,7, а эквивалентный диаметр агрегатов d_a составляет:

$$d_a = \sqrt{18,7 \cdot 0,5^2} = 2,16 \text{ мкм}$$

Зная параметр d_a и формулу для расчета объема сферической частицы $V = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$, можно рассчитать количество частиц n , формирующих агрегат:

$$n = \frac{V_a}{V_{0,5}} = \frac{d_a^3}{d_{0,5}^3} = \frac{2,16^3}{0,5^3} = 65$$

Для остальных суспензий с различной концентрацией дефлокулянта расчеты проводили аналогичным образом. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Расчетные значения эквивалентного диаметра агрегатов и количества образующих их частиц

Индекс суспензии	Параметр		
	$\frac{v_{ma}}{v_{md}}$	Эквивалентный диаметр агрегатов d_a , мкм	Количество частиц первой моды 0,5 мкм, составляющих агрегат
К0	18,7	2,16	65
К1	7,2	1,35	20
С005	6,3	1,25	16
С026	1,7	0,66	2
С033	1,1	0,52	1
С05	1,0	0,5	1

Таким образом, с увеличением концентрации дефлокулянта в суспензии, размер агрегатов уменьшается пропорционально числу частиц, составляющих этот агломерат. В исходной концентрированной суспензии (80 % тв. фазы) агрегаты образуют трехмерную сетку (рис 6), внутри которой иммобилизуется определенный объем воды,

не участвующий в обеспечении подвижности системы. Как результат, в состоянии покоя система переходит в псевдотвёрдое состояние, прочность которого определяется пределом текучести. А сама суспензия приобретает ярко выраженный тиксотропный тип течения.

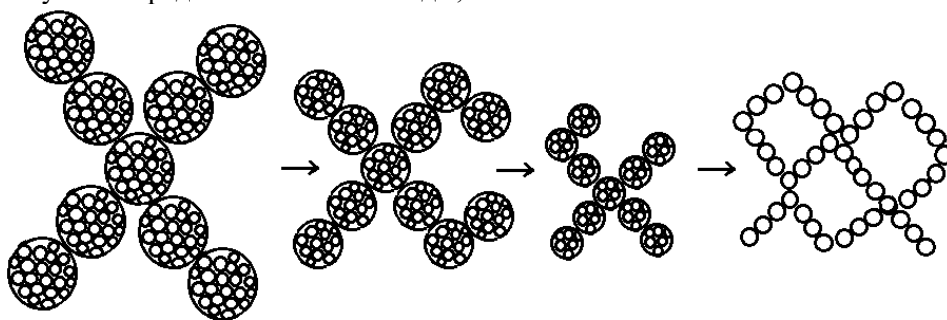


Рис. 6. Схематическое изображение трехмерной сетки агрегированных частиц при переходе от недефлокулированной к полностью дефлокулированной суспензии

Полученные данные в полной мере коррелируют с результатами, полученными при анализе текучести концентрированных водных суспензий РГ-1 с аналогичными концентрациями дефлокулянта. Для всех экспериментальных суспензий было проведено определение их времени

истечения на вискозиметре Энглера – τ_0 и τ_{30} , а также коэффициента загустевания (рис. 7). Стоит отметить, что время истечения суспензии на основе РГ0 удалось определить лишь при влажности 23 %. Полученные результаты составили: $\tau_0 = 206$ сек, $\tau_{30} = 318$ сек, $K_3 = 1,54$.

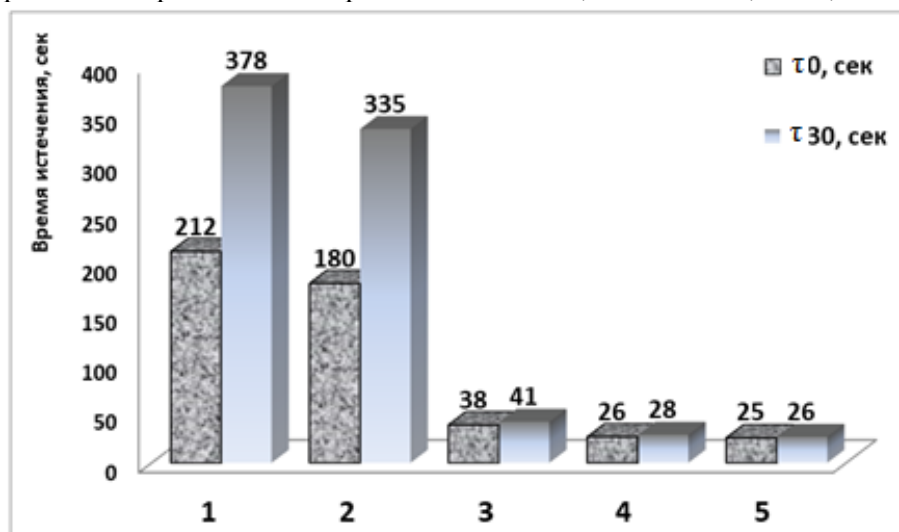


Рис. 7. Влияние концентрации ПКЭ на текучесть водных суспензий порошка РГ-1 (влажность 20 мас.%): 1 – без введения ПКЭ (K1); 2 – 0,05% ПКЭ (C005); 3 – 0,26% ПКЭ (C026); 4 – 0,33 % ПКЭ (C033) и 5 – 0,50% ПКЭ (C05)

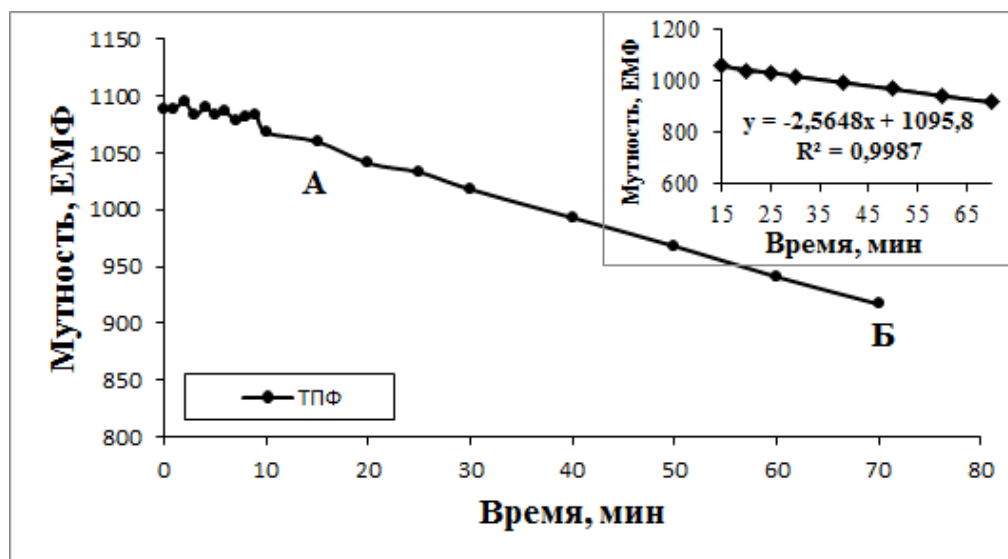


Рис. 8. Кинетическая зависимость изменения величины мутности 0,1% водных суспензий глинозема с дефлокулянтом ТПФ

Введение в систему 0,05 % ПКЭ не обеспечивает заметного улучшения текучести по сравнению с суспензией K1. Коэффициент загустевания суспензий K1 и C005 имеет близкие значения – 1,7–1,8. Увеличение количества вводимого дефлокулянта до 0,26 % уменьшает время истечения τ_0 более чем в 5 раз. А при добавлении ПКЭ в количестве 0,33 % имеет место практически полная дефлокуляция суспензии, которая сохраняет свою текучесть после 30 минут вы-

держки в вискозиметре Энглера. Такая концентрация молекул дисперсанта обеспечивает высокий уровень действия стерических и электростатических факторов, что исключает возможность агломерации высокодисперсных частиц $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Это объясняет низкую вязкость дефлокулированных суспензий на ряду с их седиментационной устойчивостью.

Универсальность и эффективность разработанной методики была апробирована в отношении дефлокулянта другой химической природы,

а именно триполифосфата натрия ТПФ, который также находит широкое применение на практике. Для проведения эксперимента была приготовлена суспензия на основе порошка РГ1 с добавлением ТПФ, содержание твердой фазы в которой – 80 %. Согласно данным статьи [16], оптимальная концентрация дефлокулянта, в случае ТПФ, составляла 0,1%. Далее данную суспензию разбавляли по методике, описанной выше. Полученная кривая изменения мутности представлена на рис. 8.

Исходя из расчетов, для данного образца эквивалентный диаметр частиц равен 0,5 мкм, что указывает на полностью дефлокулированную систему.

Выводы.

1. Предложена простая унифицированная методика оценки эффективности дефлокулянтов различной химической природы, основанная на выявлении кинетических зависимостей изменения величины мутности минеральных водных суспензий.

2. Математический анализ кривых изменения мутности суспензий с использованием уравнения седиментации Стокса позволил рассчитать, как эквивалентный диаметр агрегатов частиц в случае не полностью дефлокулированных суспензий, так и размер отдельных частиц для полностью дефлокулированных систем.

3. Полученные данные по влиянию концентрации дефлокулянта на кинетические зависимости изменения мутности 0,1 %-ых водных суспензий глинозема были подтверждены результатами, полученными при определении текучести концентрированных водных суспензий. В случае недостаточной концентрации дефлокулянта в суспензии наблюдается быстрое снижение величины мутности ввиду активного осаждения агрегатов высокодисперсных частиц твердой фазы. С увеличением концентрации дефлокулянта в суспензии, размер агрегатов уменьшается пропорционально числу частиц, слагающих этот агломерат. Суспензия становится седиментационно устойчивой, а величина мутности изменяется крайне медленно. Таким образом, анализ кинетических зависимостей изменения величины мутности водных суспензий позволяет с хорошей достоверностью оценить эффективность дефлокулянтов при их использовании в качестве компонентов минеральных водных суспензий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Demidova-Buizine I., Pundiene I. Effect of amount of deflocculant on change in physico-mechanical properties of medium-cement heat-resistant

concretes during drying and heat treatment // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2014. Vol. 55, № 2. Pp. 121–127. DOI: 10.1007/s11148-014-9673-4

2. Sarkar R., Samant A.D. Study on the effect of deflocculant variation in high-alumina low-cement castable // *Interceram - International Ceramic Review*. 2016. Vol. 28, № 7. Pp. 28–34. DOI: 10.1007/BF03401184

3. Davies J., Binner J.G.P. The role of ammonium polyacrylate in dispersing concentrated alumina suspensions // *Journal of the European Ceramic Society*. 2000. Vol. 20. Pp. 1539–1553. DOI: 10.1016/S0955-2219(00)00012-1

4. Hommer H., Wutz K. The effect of organic deflocculants in castables // *Proceedings of the Technical Association of Refractories*. 2006. Vol. 58, № 5. Pp. 248–255.

5. Von Seyerl J. Use of polycarboxylate ethers to improve workability of castables // *Ceram. Forum Int.* 2007. Vol. 9. Pp. 46–49.

6. Otroj S., Nilforushan M.R., Daghighi A., Marzban R. Impact of dispersants on the mechanical strength development of alumina-spinel self-floing refractory castables // *Ceramics–Silikáty*. 2010. Vol. 54, № 3. Pp. 284–289.

7. Elimelech M., Gregory J., Jia X., Williams R.A. Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modeling, and Simulation. Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford, 1995. 448 p. DOI: 10.1016/C2013-0-04548-3

8. Xu S., Sun Z. Progress in coagulation rate measurements of colloidal dispersions // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7. Pp. 11298–11308. DOI: 10.1039/C1SM06237A

9. Ntampou X., Zouboulis A.I., Samaras P. Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates // *Chemosphere*. 2006. Vol. 62, № 5. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.067

10. Бибик Е.Е. Оптическая диагностика процесса коагуляции // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2011. №10. С. 3–5.

11. Везо О.С., Войтылов А.В., Войтылов В.В., Петров М.П., Трусев А.А. Электрооптический метод исследования коагуляции нанодисперсных систем. Образование агрегатов частиц графита в водных электролитах // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128, №6. С. 713–721. DOI: 10.21883/OS.2020.06.49401.22-20

12. ГОСТ Р 57164-2016. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

13. Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Фурда Л.В., Скрыпников Н.С. Исследование влияния

технологических параметров на гранулометрические характеристики субмикронного оксида алюминия в α -форме // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. №12. С. 84–97.

14. Trubitsyn M.A., Furda L.V., Lisnyak V.V., Volovicheva N.A., Doan Van Dat, Le Van Thuan. Effect of deflocculants on the rheological behavior of high alumina matrix suspensions for self-flowing bauxite castable // Vietnam Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 61, № 5. Pp. 894–905. DOI: 10.15625/2525-2518/17143

Информация об авторах

Трубицын Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Воловичева Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Лисняк Виктория Владимировна, аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Бондарева Ирина Анатольевна, аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: bondareva_i@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Морозова Наталия Александровна, главный технолог ЗАО «ПКФ «НК», аспирант кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: n.morozova@nkthm.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Тарасов Игорь Александрович, студент кафедры общей химии Института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ». E-mail: 1514025@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85

Поступила 15.11.2024 г.

© Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Лисняк В.В., Бондарева И.А., Морозова Н.А., Тарасов И.А., 2025

***Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Lisnyak V.V., Bondareva I.A., Morozova N.A., Tarasov I.A.**
Belgorod National Research University
*E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru

DEFLOCCULATING ABILITY EVALUATION OF DIFFERENT CHEMICAL NATURE DISPERSANTS BY PHOTOMETRIC METHOD

Abstract. This paper presents the results of the study of possibility of using the photometric method to evaluate the effectiveness of deflocculants of different chemical nature. Aqueous suspensions of reactive alumina powders of different dispersity with addition of polycarboxylate ether in the concentration range from 0.05 to 0.50 wt. % were used as model systems. Mass fraction of solid phase for concentrated suspensions was 80%, for dilute suspensions - 0.1%. To reveal the feasibility of modern dispersants application and their optimal concentration, a photometric method of deflocculating activity estimation was developed and tested. The existing photometric method of water turbidity determination was taken as a basis for the proposed new approach. By means of mathematical analysis of kinetic curves of turbidity change in 0.1% water suspensions using the Stokes' law, the equivalent diameter of particle aggregates in case of not fully deflocculated suspensions and the size of individual particles for fully deflocculated systems were calculated. The versatility and efficiency of the developed methodology was also tested with the respect to sodium tripolyphosphate used as

a deflocculant. The obtained data on the influence of deflocculant concentration on kinetic dependences of the turbidity change of 0.1% aqueous alumina suspensions were validated using results of fluidity determination of concentrated aqueous alumina suspensions.

Keywords: deflocculation mineral powders, dispersants, aqueous suspensions, reactive alumina, turbidity, sedimentation, photometry

REFERENCES

1. Demidova-Buizine I., Pundiene I. Effect of amount of deflocculant on change in physico-mechanical properties of medium-cement heat-resistant concretes during drying and heat treatment. *Refractories and Industrial Ceramics* 2014. Vol. 55. No. 2. Pp. 121–127. DOI: 10.1007/s11148-014-9673-4
2. Sarkar R., Samant A.D. Study on the effect of deflocculant variation in high-alumina low-cement castable. *Interceram - International Ceramic Review Rev.* 2016. Vol. 28. No. 7. Pp. 28–34. DOI: 10.1007/BF03401184
3. Davies J., Binner J.G.P. The role of ammonium polyacrylate in dispersing concentrated alumina suspensions. *Journal of the European Ceramic Society.* 2000. Vol. 20. Pp. 1539–1553. DOI: 10.1016/S0955-2219(00)00012-1
4. Hommer H., Wutz K. The effect of organic deflocculants in castables. *Proceedings of the Technical Association of Refractories.* 2006. Vol. 58. No. 5. Pp. 248–255.
5. Von Seyerl J. Use of polycarboxylate ethers to improve workability of castables. *Ceram. Forum Int.* 2007. Vol. 9. Pp. 46–49.
6. Otraj S., Nilforushan M.R., Daghighi A., Marzban R. Impact of dispersants on the mechanical strength development of alumina-spinel self-flowing refractory castables. *Ceramics-Silikáty.* 2010. Vol. 54. No. 3. Pp. 284–289.
7. Elimelech M., Gregory J., Jia X., Williams R.A. *Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modeling, and Simulation.* Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford, 1995. 448 p. DOI: 10.1016/C2013-0-04548-3
8. Xu S., Sun Z. Progress in coagulation rate measurements of colloidal dispersions. *Soft Matter.* 2011. Vol. 7. Pp. 11298–11308. DOI: 10.1039/C1SM06237A
9. Ntampou X., Zouboulis A.I., Samaras P. Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere.* 2006. Vol. 62. No. 5. Pp. 722–730. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.067
10. Bibik E.E. Optical diagnostics of coagulation process [Opticheskaya diagnostika processa koagulyacii]. *Proceedings of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University).* 2011. No. 10. Pp. 3–5. (rus)
11. Vezo O.S., Voitylov A.V., Voitylov V.V., Petrov M.P., Trusov A.A. An Electrooptical Method for Studying the Coagulation of Nanodisperse Systems: Formation of Aggregates of Graphite Particles in Aqueous Electrolytes [Elektroopticheskij metod issledovaniya koagulyacii nanodispersnyh sistem. Obrazovanie agregatov chastic grafita v vodnyh elektrolitah. Optika i spektroskopiya]. *Optics and Spectroscopy.* 2020. Vol. 128. No. 6. Pp. 719–728. DOI: 10.21883/OS.2020.06.49401.22-20 (rus)
12. State Standard 57164-2016. Drinking water. Methods for determination of odor, taste and turbidity. Moscow: Standartinform Publ., 2007. 20 p. (rus)
13. Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Furda L.V., Skrypnikov N.S. Influence of technological parameters on particle size distribution characteristics of submicron aluminum oxide in α -form [Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov na granulometricheskie harakteristiki submikronnogo oksida alyuminiya v α -forme]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.* 2021. No. 12. Pp. 84–97. (rus)
14. Trubitsyn M.A., Furda L.V., Lisnyak V.V., Volovicheva N.A., Doan Van Dat, Le Van Thuan. Effect of deflocculants on the rheological behavior of high alumina matrix suspensions for self-flowing bauxite castable. *Vietnam Journal of Science and Technology.* 2024. Vol. 61. No. 5. Pp. 894–905. DOI: 10.15625/2525-2518/17143
15. Grodskiy A.S., Kienskaya K.I., Gavrilova N.N., Nazarov V.V. Basic concepts and equations of colloid chemistry [Osnovnye ponyatiya i uravneniya kolloidnoj himii]. Moscow: D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2013. 40 p. (rus)
16. Eremina R.M., Skvorcov A.I., Mutygullina A.A., Salihova O.B., Blohin D.S. Experimental problems of general physical practical work on molecular physics and thermodynamics. Transfer processes. Liquids and solids [Eksperimental'nye zadachi obshchego fizicheskogo praktikuma po molekulyarnoj fizike i termodinamike. Processy perenos. Zhidkosti i tverdye tela]. Kazan: University of Kazan, 2015. 42 p. (rus)

Information about the authors

Trubitsyn, Mikhail A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: trubitsin@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Volovicheva, Natalya A. PhD, Assistant professor of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: volovicheva@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Lisnyak, Viktoriya V., Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: lisnyak@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Bondareva, Irina A., Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: bondareva_i@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85.

Morozova, Natalia A., chief technologist CJSC «PKF «NK», Postgraduate student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: n.morozova@nkthm.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Tarasov, Igor A. Student of the Department of General Chemistry, Institute of Pharmacy, Chemistry and Biology of the National Research University «BelSU». E-mail: 1514025@bsu.edu.ru. Belgorod National Research University, Russia, 308015, Belgorod, st. Pobedy, 85

Received 15.11.2024

Для цитирования:

Трубицын М.А., Воловичева Н.А., Лисняк В.В., Бондарева И.А., Морозова Н.А., Тарасов И.А. Оценка дефлокулирующей способности дисперсантов различной химической природы фотометрическим методом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-95-106

For citation:

Trubitsyn M.A., Volovicheva N.A., Lisnyak V.V., Bondareva I.A., Morozova N.A., Tarasov I.A. Deflocculating ability evaluation of different chemical. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 95–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-95-106

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-107-116

¹Новоселов А.Г., ^{1,*}Никитина М.А., ¹Дреер Ю.И., ¹Таралло З.В., ²Мануйлов В.Е.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²ООО «ТЕХПРОМ – ИНЖИНИРИНГ»

*E-mail: mn111993@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ФАЗООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СИНТЕЗЕ КАЛЬЦИЕВО-АЛЮМОФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА

Аннотация. В статье рассматривается влияние примесных оксидов SiO_2 , MgO , TiO_2 , K_2O , Na_2O в количестве 1 и 3 % (каждого соответственно) при синтезе кальцево-алюмоферритного клинкера. Изучено фазообразование в системе $\text{CaCO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ в температурном диапазоне 1250–1280 °C с изотермической выдержкой 40 мин. Приводятся результаты рентгеноструктурного анализа сформированного фазового состава кальцево-алюмоферритного клинкера в «нулевой» смеси и с вводом 1 и 3 % примесных соединений. Проведен анализ формирования алюминатных, ферритных и/или алюмоферритных фаз клинкера в смесях с вводом примесных оксидов. Установлено, что в процессе обжига «нулевой» смеси А0 образуется значительное количество алюминатных фаз состава СА и C_3A , в смеси А1 – C_{12}A_7 и СА, в смеси А3 – СА. В спеке смесей А0 и А1 формируется алюмоферритная фаза переменного состава $\text{Ca}_2\text{Al}_{0,6}\text{Fe}_{1,4}\text{O}_5$, а в смеси А3 ферритная фаза C_2F . Образование второстепенных фаз наблюдается при вводе 3 % примесных оксидов, к ним относятся соединения $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$, $(\text{K},\text{Na})\text{FeSi}_3\text{O}_8$ ($d, \text{Å}$ 4,28; 3,96; 3,70; 3,45), а также небольшое количество C_2AS и C_2S . Рекомендуется принять оптимальной температурой синтеза для смеси А0 – 1250 °C, для смеси А1 – 1250 °C и смеси А3 – 1170 °C с изотермической выдержкой 40–50 минут.

Ключевые слова: кальцево-алюмоферритный клинкер, моноалюминат кальция, алюмоферрит кальция, геленит, второстепенные фазы, примесные соединения

Введение. При получении любого вида вяжущего используются сырьевые материалы различного генезиса, химического и минералогического составов. Подбор и оценка пригодности того или иного сырьевого компонента является важным этапом разработки и получения строительного вяжущего материала [1–3]. При проектировании состава особое внимание уделяется наличию и достаточному количеству основных оксидов в химическом составе сырья.

Основной химический состав портландцемента, включающий такие оксиды как CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , играет ключевую роль при образовании клинкерных минералов C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF и, соответственно, в формировании физико-механических и общестроительных свойств цемента [4]. Исследования в этой области сосредоточены на изучении влияния компонентов, состоящих из данных оксидов, на состав клинкерных фаз, термодинамику процесса синтеза, прочностные характеристики и долговечность бетона.

Также любое сырье: природное или технологическое, содержит и примесные соединения (оксиды). Например, такие как MgO , TiO_2 , Cr_2O_3 , SO_3 , Na_2O и K_2O и другие, несут в себе весомую роль в изменении фазового состава портландцемента, влияя на минералогический состав, микроструктуру клинкера, гидравлические свойства и технологические параметры синтеза [5–6]. Примесные вещества вступают в химические реакции с основными оксидами и приводят к формированию дополнительных фаз или твердых

растворов основных клинкерных минералов, изменению микроструктуры, а также к увеличению или снижению температуры спекания клинкера [7–8].

Например, в статье [9] изучалось индивидуальное воздействие Na_2O и K_2O на процесс фазообразования и микротвердость силикатной фазы, а также влияние сформированной микроструктуры на процесс измельчения синтезированного портландцементного клинкера. Авторами установлено, что в присутствии оксида калия можно наблюдать раннее образование силикатной фазы и значительное повышение ее микротвердости, в сравнении с клинкером, полученным из сырьевой смеси, содержащей оксид натрия.

Исследования механизма влияния оксидного состава на формирование фазового состава в клинкерах специального назначения, например, сульфоалюминатном, сульфоферритном, кальцево-алюмоферритном и других видах тоже является на данный момент актуальным научным направлением [10–11].

В работе [12] автор рассматривает влияние оксидов Na_2O , K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 и CaO в различных количествах на фазообразование в сырьевой смеси при синтезе сульфоалюмосиликатной добавки (САСД). Из результатов исследования автор приходит к выводу, что щелочные оксиды активно воспрепятствуют образованию основным фазам САСД: сульфоалюминату и сульфосиликату кальция. Оксиды железа (III) и титана также

оказывают вредное воздействие, приводя к образованию твердых растворов сульфоалюмината кальция.

Мандрикова О.С. в работе [13] исследовала совместное влияние TiO_2 и Cr_2O_3 на формирование фазового состава сульфоферритного клинкера. Автором установлено, что при комплексном вводе TiO_2 и Cr_2O_3 происходит внедрение оксидов в кристаллическую решетку C_2F , вследствие чего интенсивность пика C_2F на дифракционных спектрах увеличивается, в сравнении со смесью, где оксид титана введен раздельно.

Гребенюк А.А. в работе [14] утверждает, что оптимальным количеством ввода Na_2O в качестве минерализатора в смесь, рассчитанную на получение высокоосновного сульфоферритного клинкера, является 0,5–1,0 %. Положительным эффектом служит увеличение скорости процесса формирования фазы двухкальцевого сульфоферрита, в низкотемпературной и высокотемпературной зонах. Это характеризуется значительным увеличением дифракционных отражений C_2S в процессе сульфатизации фазы.

В работе [15] установлено, что в присутствии в сырьевой смеси хлорида натрия и нитрата калия при синтезе сульфоалюминатного клинкера наблюдается изменение в скорости протекания реакции формирования фазы сульфоалюмината кальция, а также при этом происходит снижение температуры клинкерообразования.

В статьях [16–17] рассматривается вопрос о применении ферритного отхода, содержащего около 25 % β - SiO_2 в процессе получения сульфоферритного клинкера. Автор акцентирует внимание на том, что данный отход может быть переработан или использован в производственных процессах, а также способствовать эффективному использованию ресурсов и снижению негативного влияния на окружающую среду.

Однако, в литературе отсутствуют данные о комплексном влиянии основных примесных соединений, содержащих оксиды SiO_2 , MgO , TiO_2 , Na_2O и K_2O , на процесс фазообразования при

спекании материалов в трехкомпонентной системе $CaCO_3$ – Al_2O_3 – Fe_2O_3 . Так как влияние примесных соединений наиболее характерно прослеживается при использовании не столько сырья природного происхождения, сколько при применении техногенных отходов в качестве корректирующих добавок или основных сырьевых компонентов. А также данная система представляет собой интересный объект для исследования, так как имеет значение для получения портландцемента и цементов специального назначения.

Целью данной работы было изучить воздействие примесных соединений SiO_2 , MgO , TiO_2 , Na_2O и K_2O на фазообразование при синтезе кальцево-алюмоферритного клинкера. Задачи исследования: рассмотреть влияние примесных соединений при вводе каждого по отдельности в количестве 1 и 3 % (суммарное количество примесных оксидов в смесях составляет 5 и 15 % соответственно) на формирование основных и второстепенных фаз клинкера, а также на технологические особенности синтеза.

Методы, оборудование, материалы. Исходными компонентами исследования являются химические реактивы: $CaCO_3$ («чда»), Al_2O_3 («чда»), Fe_2O_3 («осч»), $SiO_2 \cdot nH_2O$ («ч»), $Mg(OH)_2$ («чда»), TiO_2 («ч»), Na_2CO_3 («ч»), K_2CO_3 («чда»).

Методы и оборудование, применяемые в исследовании: химический анализ (прибор – рентгенофлуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции; рентгенофазовый анализ (прибор – рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific). Расчет сырьевых смесей осуществлялся в программе Excel на основании кальцево-алюмоферритного (CAF_m) и глиноземистого (р) модулей.

Для исследования фазообразования в системах $CaCO_3$ – Al_2O_3 – Fe_2O_3 (смесь «нулевая») и $CaCO_3$ – Al_2O_3 – Fe_2O_3 + примесные соединения (SiO_2 , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O) в количестве 1 и 3 % (каждого оксида, соответственно) были приготовлены 3 сырьевые смеси, компонентный состав которых представлен в таблице 1.

Таблица 1

Компонентный состав сырьевых смесей

CaCO ₃ , масс. %		Al ₂ O ₃ , масс. %		Fe ₂ O ₃ , масс. %	
Смесь «нулевая» (шифр <i>Смесь А0</i>)					
56,1		30,6		13,3	
Смесь А0 + 1 % примесных соединений (шифр <i>Смесь А1</i>)					
SiO ₂ ·nH ₂ O, масс. %	Mg(OH) ₂ , масс. %	TiO ₂ , масс. %	Na ₂ CO ₃ , масс. %	K ₂ CO ₃ , масс. %	
1,17	1,45	1,00	1,71	1,47	
Смесь А0 + 3 % примесных соединений (шифр <i>Смесь А3</i>)					
3,52	4,35	3,00	5,13	4,40	

Условия эксперимента: лабораторная электропечь сопротивления СКВ 2.3.2/14,5 с карбидо-

кремниевыми нагревателями; образцы в виде цилиндрических таблеток массой навески 10 г, диаметр 30 мм, высота 10 мм; общий температурный

диапазон исследования 1150–1280 °С (интервал 10°С), изотермическая выдержка 40 мин, метод спекания с воздушным резким охлаждением.

Идентификация полученного фазового состава клинкеров осуществлялась с использованием Международной базы данных ICDD (программ Search-Match и Match3, и указателя Финка).

Основная часть.

Фазообразование в системе $\text{CaCO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ в температурном интервале 1250–1280 °С. При изучении влияния примесных соединений на формирование фазового состава при синтезе кальцево-алюмоферритного клинкера (КАФК) была приготовлена «нулевая» сырьевая смесь А0 на основании ранее предложенного кальцево-алюмоферритного модуля [18]. Расчетный минералогический состав клинкера представлен в таблице 2.

Таблица 2

Расчетный минералогический состав клинкера

Шифр	Коэффициенты расчета		Расчетное содержание фаз, %		
	КАФ _м	р	С ₄ АF	АI-фазы	Пр.
Клинкер смеси А0	0,55	2,3	53,3	45,2	1,5

Основными фазами кальцево-алюмоферритного клинкера, при условии отсутствия примесных соединений, могут являться алюминаты кальция разной основности (СА, СА₂, С₁₂А₇ и С₃А), ферриты кальция (CF, C₂F) и/или алюмоферриты кальция.

Для достижения данной цели проводилась серия изотермических спеканий в интервале температур 1250–1280 °С со шагом 10 °С. Анализ процесса формирования фазового состава кальцево-алюмоферритного клинкера проводили на основании образования основных алюминатных фаз СА (d=2,97Å), С₃А (d=2,70; 1,91Å), С₁₂А₇ (d=4,89; 3,00; 2,68; 1,95Å), ферритных CF (d=2,66; 2,52; 2,23; 2,11; 1,83Å) и C₂F (d=7,40; 2,80; 2,71; 2,68; 1,93Å) и/или алюмоферритных фаз С₄АF (d=7,24; 2,78; 2,67; 2,63; 1,92Å) и C₂(Al,Fe)₂O₅ (d=7,25; 2,77; 2,69; 2,65; 1,93Å).

При обжиге «нулевой» смеси А0 при температурах 1250–1280 °С на рентгенограмме (рис. 1) видно, что в качестве ключевой алюминатной фазы происходит образование СА (d=2,97Å) и С₃А (d=2,70Å). Наблюдается в незначительном количестве и наличие фаз С₁₂А₇ (d=2,91Å) и СА₂ (d=3,52Å). Отмечается, что с повышением температуры до 1280 °С идет снижение интенсивности

фаз СА на 33 % и С₃А на 11,5 % относительно температуры 1250 °С.

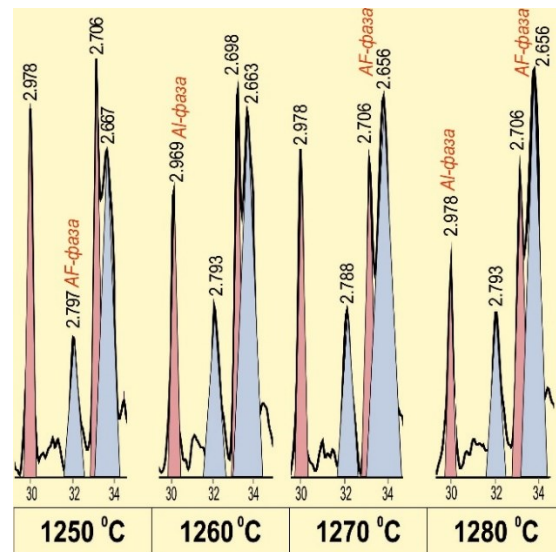


Рис. 1. Изменение фазового состава КАФК в диапазоне температур 1250–1280 °С

Снижение относительного содержания в клинкере фазы С₃А характеризуется также уменьшением интенсивности рефлекса d=1,91Å (рис. 3).

Предполагается, что при 1280 °С межплоскостное расстояние d=2,71Å принадлежит только алюмоферритной фазе. Это связано с заметным увеличением интенсивности сопутствующих рефлексов d=7,24; 1,93Å. Так интенсивность рефлекса d=7,24Å увеличивается на 45,1 %, а d=1,93Å на 41,9 % относительно температуры 1250 °С (рис. 2–3). Стоит отметить, что с повышением температуры до 1280 °С образуется расплав.

Образование алюмоферритной фазы происходит постепенно и при температуре 1250 °С, согласно идентификации фазы, при помощи программы Search-Match и указателя Финка, был установлен состав фазы с химической формулой 2CaO·0.3Al₂O₃·0.7Fe₂O₃ (C₂Al_{0,6}Fe_{1,4}O₅). С повышением температуры до 1280 °С фиксируются отражения с межплоскостными расстояниями d=7,24; 2,78; 2,71; 2,63; 1,93Å, принадлежащими алюмоферритной фазе состава 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃.

Установлено, что оптимальный минералогический состав КАФК при спекании смеси А0 формируется при температуре 1250 °С (рис. 4). Химический и фактический фазовый состав клинкера представлен в таблице 3.

Фазовый состав представлен следующими клинкерными соединениями: СА, С₃А, С₁₂А₇(следы), СА₂(следы) и C₂Al_{0,6}Fe_{1,4}O₅.

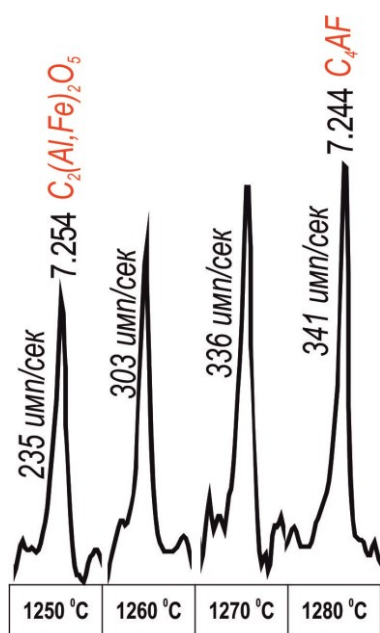


Рис. 2. Изменение интенсивности AF-фазы

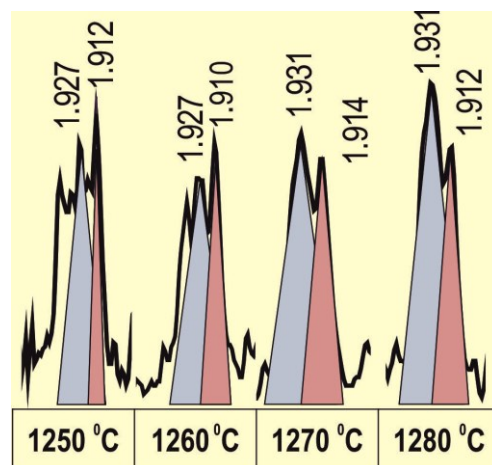


Рис. 3. Фрагмент рентгенограммы в области двойных углов отражения 46–48°

Таблица 3

Химический и фактический минералогический состав клинкера

Шифр	Содержание оксидов, масс. %				Содержание клинкерных фаз, %		
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Прочие	C ₂ Al _{6.6} Fe _{1.4} O ₅	Al-фазы	Прочие
Клинкер смеси А0	40,37	17,55	40,60	1,48	35,7	62,8	1,5

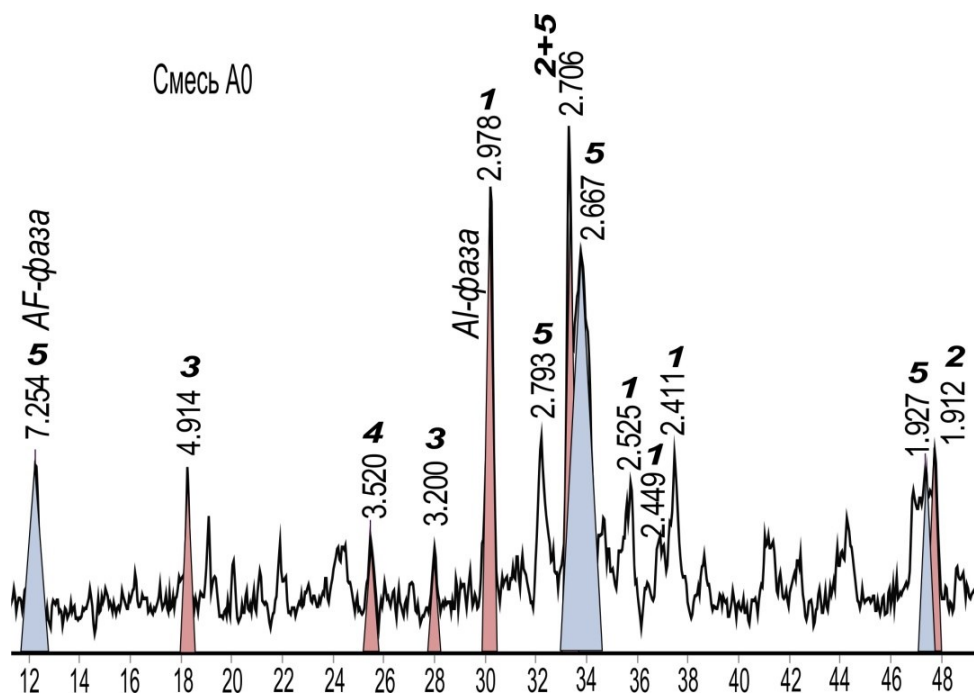


Рис. 4. Рентгенограмма оптимального фазового состава КАФК (t=1250 °C)

1 – CA, 2 – C₃A, 3 – C₁₂A₇, 4 – CA₂, 5 – 2CaO·0.3Al₂O₃·0.7Fe₂O₃

Результаты термической обработки сырьевых смесей, содержащих 1 и 3 % примесных соединений, свидетельствуют, что ввод примесей оказывает значительное влияние на физико-химические процессы формирования основных

фаз. При вводе 1 % примесей наблюдается понижение температуры плавления до 1270 °C, при вводе 3 % – до 1190 °C.

Анализ рентгенограмм спека *смеси А1* (рис. 5) показал, что основными алюминатными фазами клинкера являются $C_{12}A_7$ ($d=4,92$; $3,01\text{\AA}$) и СА ($d=2,97\text{\AA}$).

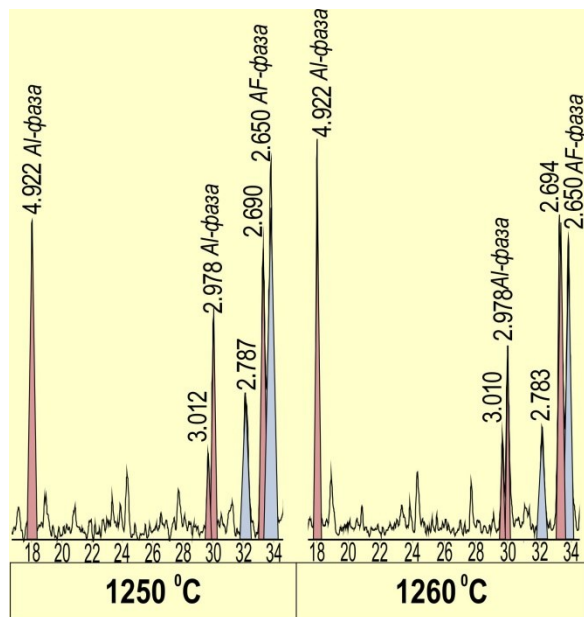


Рис. 5. Изменение фазового состава КАФК из *смеси А1* в диапазоне температур 1250–1260 °C

Интенсивность отражений фазы $C_{12}A_7$ в спеке *смеси А1* при температуре 1250 °C составляет 511 имп/сек, при 1260 °C – 712 имп/сек, что на 59,3 % (208 имп/сек) выше интенсивности в спеке *смеси А0* при температуре 1250 °C. Интенсивность отражений фазы СА в спеке *смеси А1* при температуре 1250 °C составляет 344 имп/сек, при 1260 °C – 340 имп/сек, что на 46,2% (639

имп/сек) ниже интенсивности СА в спеке *смеси А0* при температуре 1250 °C.

Стоит отметить, что при вводе по 1 % примесных оксидов (суммарно 5%) более интенсивно происходит образование фазы $C_{12}A_7$, в отличие от смеси без добавления примесей (*смесь А0*). Причем именно фаза $C_{12}A_7$ становится основной алюминатной фазой. Вероятнее всего на данный процесс влияет оптимальное количество примесных оксидов, таких как Na_2O и K_2O .

Процесс формирования алюмоферритной фазы состава $2CaO \cdot 0.3Al_2O_3 \cdot 0.7Fe_2O_3$ происходит идентично, как и в спеке *смеси А0*. Отличительной особенностью является изменение параметров кристаллической решетки AF-фазы, это характеризуется смещением межплоскостного расстояния $7,254\text{\AA} \rightarrow 7,314\text{\AA}$ при температуре 1250 °C в клинкерах *смеси А0* и *смеси А1*. Предположительно, это связано с внедрением в кристаллическую решетку фазы, например, TiO_2 или иных оксидов, и образованием твердых растворов.

Наличие второстепенных фаз в спеке *смеси А1* не наблюдается. Формирование оптимального фазового состава отмечается, также как в спеке *смеси А0*, при температуре 1250 °C (рис. 6). Данная температура обжига выбрана исходя из того, что по свойствам клинкер, полученный при температуре 1250 °C, должен быть схож с клинкером, полученным при 1260 °C. А так как до температуры плавления смеси А1 остается небольшой температурный интервал – 10 °C, то для увеличения температурного запаса была выбрана температура обжига 1250 °C.

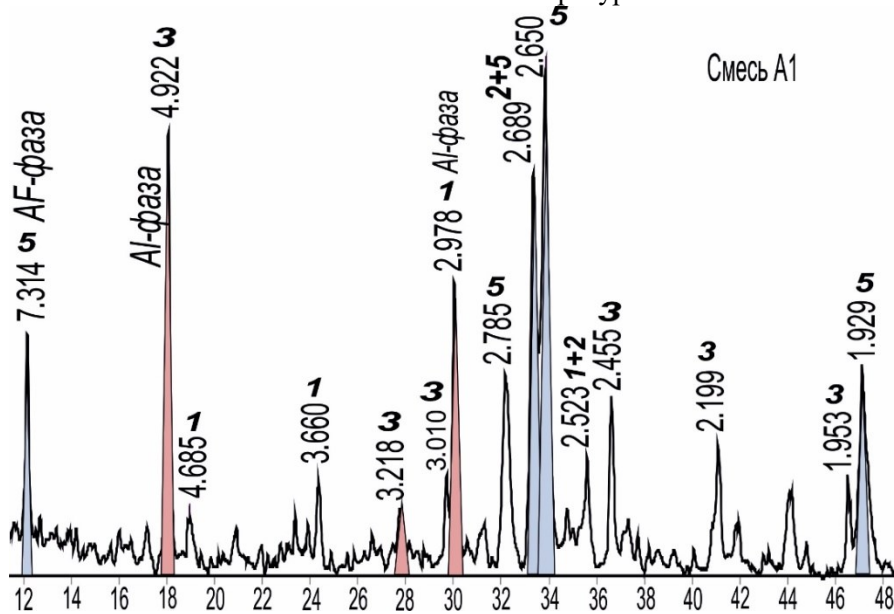


Рис. 6. Рентгенограмма оптимального фазового состава КАФК ($t=1250\text{ °C}$)

1 – СА, 3 – $C_{12}A_7$, 5 – $2CaO \cdot 0.3Al_2O_3 \cdot 0.7Fe_2O_3$

При увеличении доли примесей до 3 % (суммарно до 15 %) протекание физико-химических

реакций становится более заметным. В частности, температурный диапазон плавления изменяется, и наблюдается образование второстепенных фаз в клинкере.

Результаты исследования показали (рис. 7), что в спеке *смеси А3* преобладающей алюминатной фазой является СА ($d=2,97\text{\AA}$) во всём температурном диапазоне, а также до температуры 1180°C можно наблюдать незначительное содержание C_3A и C_{12}A_7 . При этом с повышением температуры от 1150 до 1170°C происходит увеличение содержания алюминатной фазы. Об этом свидетельствует повышение интенсивности соответствующих отражений на рентгенограммах

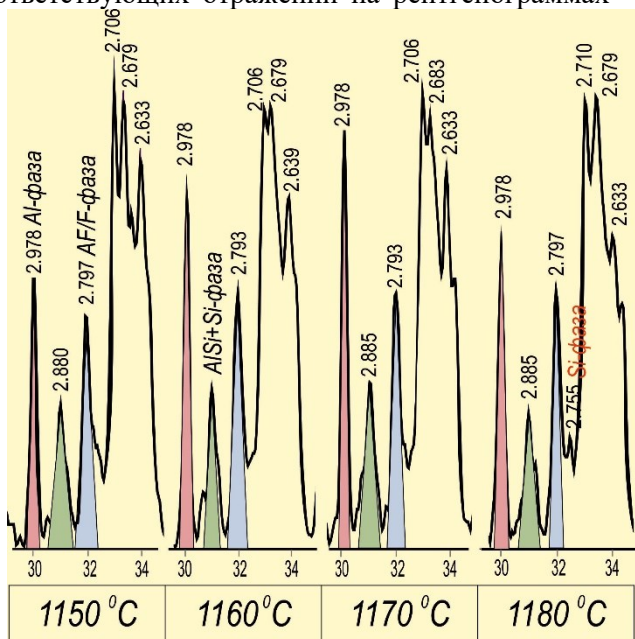


Рис. 7. Фрагмент рентгенограммы спека *смеси А3*

Алюмоферритная фаза образуется в спеках *смеси А0 и А1*, но не наблюдается в спеке *смеси А3*. На рентгенограмме спека (рис. 7) идентифицируется наличие ферритной фазы C_2F ($d=7,34; 2,80; 2,71; 2,68; 1,94\text{\AA}$). На рисунке 8

спеков. При дальнейшем повышении температуры до 1180°C наблюдается некоторое снижение дифракционных отражений алюминатной фазы.

Согласно полученным результатам формирование оптимального минералогического состава КАФК в спеке *смеси А3* происходит при температуре 1170°C . При этом интенсивность отражений фазы СА составляет 496 имп/сек, что на 22,4 % ниже в сравнении с интенсивностью отражений СА в спеке *смеси А0*, и на 44,2 % ниже, чем в спеке *смеси А1* (344 имп/сек).

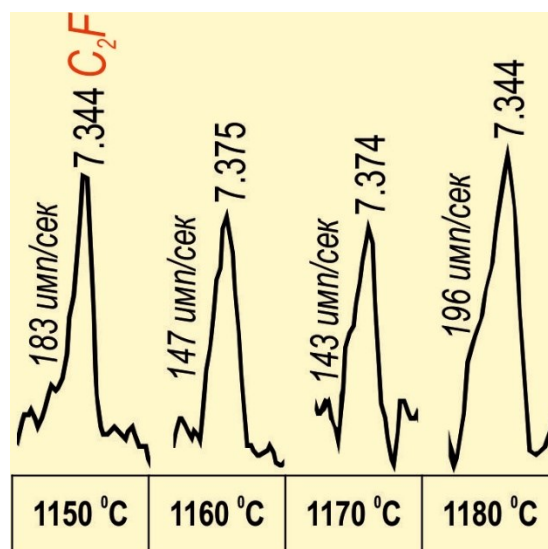


Рис. 8. Изменение интенсивности C_2F в спеке (*смесь А3*)

представлены данные по изменению интенсивности отражений фазы C_2F в температурном диапазоне термической обработки *смеси А3* $1150\text{--}1180^\circ\text{C}$.

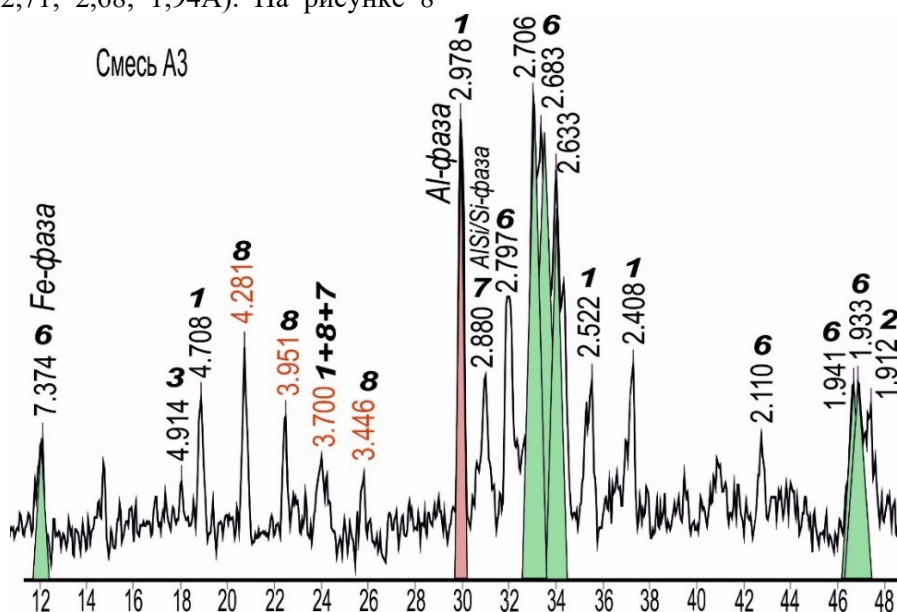


Рис.9. Рентгенограмма оптимального фазового состава КАФК ($t=1170\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 1 – СА, 2 – C_3A , 3 – C_{12}A_7 , 6 – C_2F , 7 – $\text{C}_2\text{AS}+\text{C}_2\text{S}$, 8 – $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$, $(\text{K},\text{Na})\text{FeSi}_3\text{O}_8$

На рисунке 9 представлен оптимальный фазовый состав спека **смеси АЗ**, полученный при температуре синтеза $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Следует отметить, что состав кальцево-алюмоферритного клинкера **смеси АЗ** представлен и второстепенными соединениями $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ и $(\text{K},\text{Na})\text{FeSi}_3\text{O}_8$ ($d=4,28; 3,96; 3,70; 3,45\text{ \AA}$), C_2AS и C_2S ($d=3,70; 2,88; 1,75\text{ \AA}$).

Выводы.

1. При получении кальцево-алюмоферритного клинкера из реактивов без добавления примесных соединений с повышением температуры обжига с 1250 до $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит снижение количества алюминатной фазы и повышение количества алюмоферритной фазы. Основной алюминатной фазой при оптимальной температуре обжига $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ является моноалюминат кальция СА. Состав алюмоферритной фазы изменяется от $2\text{CaO}\cdot 0,3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3$ до $4\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

2. При введении в сырьевую смесь 1% примесных оксидов (суммарно 5%) при температуре обжига $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ основной алюминатной фазой является C_{12}A_7 . Алюмоферритная фаза представлена, как и для **смеси А0**, составом $2\text{CaO}\cdot 0,3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 0,7\text{Fe}_2\text{O}_3$.

3. При введении в сырьевую смесь 3% примесных оксидов (суммарно 15%) с повышением температуры обжига с 1150 до $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит увеличение содержания алюминатной фазы. Основной алюминатной фазой является СА на всем температурном интервале. Основной алюмоферритной фазой на всем температурном интервале является фаза состава $2\text{CaO}\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

4. Ввод примесных соединений в количестве 1% не приводит к существенному изменению фазового состава КАФК, а при увеличении до 3% примесных оксидов в фазовом составе спека из **смеси АЗ** наблюдается наличие соединений $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$, $(\text{K},\text{Na})\text{FeSi}_3\text{O}_8$, C_2AS и C_2S .

5. Оптимальной температурой обжига для получения кальцево-алюмоферритного клинкера для смесей без добавления (смесь А0) и с 1% (смесь А1) примесных соединений является $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для смеси с добавлением 3% (смесь АЗ) примесных соединений – $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эти результаты имеют значительное практическое значение для промышленности, а также позволяют в дальнейшем оптимизировать процессы производства КАФК, что, в свою очередь, может привести к повышению качества готового продукта и снижению производственных затрат.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030» (проект

№ СП1-4/3-2024 «Разработка способов интенсификации физико-химических процессов высокотемпературного синтеза клинкера в производстве различных видов цементов») с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапова Е.Н., Сулименко Л.М. Влияние природы цементного сырья на процессы структурообразования при обжиге клинкера // Цемент и его применение. 2010. № 1. С. 182–186.
2. Крутилин А.А., Крапчетова Т.В., Инькова Н.А., Пахомова О.К. Влияние однородности химико-минералогического состава сырьевых смесей на прочностные характеристики портландцементного клинкера // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142
3. Дмитриева Е.А., Потапова Е.Н. Влияние щелочеактивированных глин на свойства портландцемента // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 3(252). С. 53–55.
4. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Мир, 1996. 560 с.
5. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1980. 472 с.
6. Барбанягрэ В.Д., Мишин Д.А. Жидкофазное спекание портландцементного клинкера в присутствии TiO_2 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 5. С. 27–30.
7. Erygina A.O., Mishin D.A. Interaction of potassium oxide with calcium aluminate // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 179–183. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_27
8. Ерыгина А.О., Мишин Д.А., Класен В.К. Последовательность взаимодействий Na_2O с клинкерными минералами при их различных сочетаниях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С. 98–104. DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543
9. 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.
10. Самченко С.В., Кузнецова Т.В. Влияние микропримесей на фазовый состав глиноземистых цементов // Современные задачи инженерных наук: Сборник научных трудов Симпозиума и Международного научно-технического форума. Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, 2017. С. 102–105.

11. Ideker J.H., Scrivener K.L., Fryda H., et al. Calcium Aluminate Cement // *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 2019. Pp. 537–584.
12. Кузьменков М.И., Мечай А.А., Куницкая Т.С. Влияние состава глин на минералообразование и свойства сульфоалюмосиликатной добавки // *Цемент и его применение*. 1998. № 5–6. С. 17–19.
13. Мандрикова О.С., Борисов И.Н. Роль примесных элементов при синтезе сульфоферритного клинкера, используемого для получения высококачественного безусадочного цемента // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2013. № 2(29). С. 42–47.
14. Гребенюк А.А. Исследование специфики образования силико-сульфата кальция при обжиге сырьевых смесей // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*, 2017. С. 102–106.
15. Мин Х.Х., Потапова Е.Н. Синтез сульфоалюминатного клинкера в присутствии щелочей // *Успехи в химии и химической технологии*. 2023. Т. 37. № 5(267). С. 151–153.
16. Гребенюк А.А., Борисов И.Н. Изучение возможности получения расширяющейся добавки на основе ферритного отхода с высоким содержанием β -кварца // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 7. С. 152–158.
17. Гребенюк А.А., Борисов И.Н. Снижение количества образующихся промежуточных соединений при синтезе сульфоферритного клинкера // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 12. С. 188–194. DOI: 10.12737/22803
18. Никитина М.А., Борисов И.Н., Тимошенко Т.И. Оценочная характеристика качества кальцево-алюминатного цемента с использованием техногенных материалов // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2020. № 4(61). С. 16–25.

Информация об авторах

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: novosolovag@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Никитина Мария Анатольевна, инженер 2-й категории. E-mail: mn111993@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дреер Юлия Ивановна, аспирант. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Таралло Захар Владиславович, аспирант. E-mail: tarallo.1998@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мануйлов Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, директор департамента по наладке технологического оборудования. E-mail: vmanujlov@yandex.ru. ООО «ТП-ИНЖИНИРИНГ». Россия, 630102, Новосибирск, ул. Зыряновская, д. 63.

Поступила 21.11.2024 г.

© Новоселов А.Г., Никитина М.А., Дреер Ю.И., Таралло З.В., Мануйлов В.Е., 2025

¹Novoselov A.G., ^{1,*}Nikitina M.A., ¹Dreer Yu.I., ¹Tarallo Z.V., ²Manuylov V.E.

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

²ООО «ТП – ENGINEERING»

*E-mail: mn111993@mail.ru

STUDY OF THE EFFECT OF IMPURITY COMPOUNDS ON PHASE FORMATION IN THE SYNTHESIS OF CALCIUM-ALUMOFERRITE CLINKER

Abstract. The article discusses the effect of impurity oxides SiO_2 , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O in the amount of 1 and 3 % (each, respectively) in the synthesis of calcium-alumoferrite clinker. Phase formation in the $\text{CaCO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ system has been studied in the temperature range of 1250–1280 °C with an isothermal exposure of 40 minutes. The results of an X-ray diffraction analysis of the formed phase composition of calcium-alumoferrite clinker in a «zero» mixture and with the addition of 1 and 3 % of impurity compounds are presented. The analysis of the formation of aluminates, ferritic and/or aluminoferrite phases of clinker in mixtures with the introduction of impurity oxides is carried out. It was found that during the firing of the «zero» mixture A0, a significant amount of aluminate phases of the composition CA and C_3A are formed, in the mixture A1 – C_{12}A_7 and CA, in the mixture A3 – CA. An alumoferrite phase of variable composition $\text{Ca}_2\text{Al}_{0.6}\text{Fe}_{1.4}\text{O}_5$ is

formed in the sinter of mixtures A0 and A1, and a ferritic phase C_2F is formed in mixture A3. The formation of secondary phases is observed with the introduction of 3 % impurity oxides, these include compounds $(K,Na)AlSi_3O_8$, $(K,Na)FeSi_3O_8$ ($d, \text{\AA}$ 4.28; 3.96; 3.70; 3.45), as well as a small amount of C_2AS and C_2S . It is recommended to take the optimal synthesis temperature for the mixture A0 – 1250 °C, for the mixture A1 – 1250 °C and mixtures A3 – 1170 °C with an isothermal exposure of 40-50 minutes.

Keywords: calcium-aluminoferrite clinker, calcium monoaluminate, calcium aluminoferrite, helenite, minor phases, impurity compounds

REFERENCES

1. Potapova E.N., Sulimenko L.M. Vliyanie prirody tsementnogo syrya na protsessy strukturnogoobrazovaniya pri obzhige klinkera [Influence of Cement Raw Materials on the Processes of Structure Formation During Clinker Firing]. Tsement i ego primeneniye. 2010. No. 1. Pp. 182–186. (rus)
2. Krutilin A.A., Krapchetova T.V., In'kova N.A., Pahomova O.K. Vliyanie odnorodnosti himiko-mineralogicheskogo sostava syr'evykh smesey na prochnostnye harakteristiki portlandcementnogo klinkera. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2023. T. 25. № 4. S. 129–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-129-142. (rus)
3. Dmitrieva E.A., Potapova E.N. Vliyanie shchelochekaktivirovannykh glin na svoystva portlandtsementa [Influence of Alkali-Activated Clays on Portland Cement Properties]. Uspikhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2022. Vol. 36. No. 3(252). Pp. 53–55. (rus)
4. Taylor H. Khimiya tsementa [Chemistry of Cement]. M.: Mir, 1996. 560 p. (rus)
5. Butt Yu.M., Sychev M.M., Timashev V.V. Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov [Chemical Technology of Binding Materials]. M.: Vysshaya shkola, 1980. 472 p. (rus)
6. Barbanyagre V.D., Mishin D.A. Zhi-dofaznoe spekanye portlandtsementnogo klinkera v prisutstvii TiO_2 [Liquid Phase Sintering of Portland Cement Clinker in the Presence of TiO_2]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2003. No. 5. Pp. 27–30. (rus)
7. Erygina A.O., Mishin D.A. Interaction of potassium oxide with calcium aluminate. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. Pp. 179–183. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_27.
8. Erygina A.O., Mishin D.A., Klassen V.K. Posledovatel'nost' vzaimodeystviy Na_2O s klinkernymi mineralami pri ikh razlichnykh sochetaniyakh [Sequence of Interactions of Na_2O with Clinker Minerals in Different Combinations]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 98–104. DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543. (rus)
9. Mishin D.A., Erygina A.O. Individual'noye vliyanie Na_2O i K_2O na svoystva portlandtsementnogo klinkera [Individual Influence of Na_2O and K_2O on Portland Cement Clinker Properties]. Tsement i ego primeneniye. 2021. No. 4. Pp. 64–66. (rus)
10. Samchenko S.V., Kuznetsova T.V. Vliyanie mikroprimesej na fazovyy sostav glinozemistykh tsementov [Influence of Microimpurities on the Phase Composition of Alumina Cements]. Sovremennyye zadachi inzhenernykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov Simpoziuma i Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma. Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet im. A.N. Kosygina, 2017. Pp. 102–105. (rus)
11. Ideker J.H., Scrivener K.L., Fryda H., et al. Calcium Aluminate Cement. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 2019. Pp. 537–584.
12. Kuz'menkov M.I., Mechay A.A., Kunit-skaya T.S. Vliyanie sostava glin na mineraloobrazovaniye i svoystva sulfoalumosilikatnoy dobavki [Influence of Clay Composition on Mineral Formation and Properties of Sulfoaluminosilicate Additives]. Tsement i ego primeneniye. 1998. No. 5–6. Pp. 17–19. (rus)
13. Mandrikova O.S., Borisov I.N. Rol' primesnykh elementov pri sintese sulfoferritnogo klinkera, ispol'zuyemogo dlya polucheniya vysokokachestvennogo bezusadochnogo tsementa [Role of Impurities in the Synthesis of Sulfoferrite Clinker Used for Producing High-Quality Shrinkage-Free Cement]. ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi. 2013. No. 2(29). Pp. 42–47. (rus)
14. Grebenyuk A.A. Issledovaniye spetsifiky obrazovaniya siliko-sulfata kal'tsiya pri obzhige syr'evykh smeshey [Study of the Specifics of Calcium Silico-Sulfate Formation During Firing of Raw Mixes]. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh. Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova, 2017. Pp. 102–106. (rus)
15. Min K.Kh., Potapova E.N. Sintez sulfoaluminatnogo klinkera v prisutstvii shchelochey [Synthesis of Sulfoaluminate Clinker in the Presence of Alkalis]. Uspikhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2023. Vol. 37. No. 5(267). Pp. 151–153. (rus)
16. Grebenyuk A.A., Borisov I.N. Izuchenie vozmozhnosti polucheniya rasshiryayushchey dobavki na osnove ferritnogo otkhoda s vysochym sodержaniem β -kvartsov [Study of the Possibility of Producing an Expanding Additive from Ferritic Waste with a High Content of β -Quartz]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 152–158. (rus)

17. Grebenyuk A.A., Borisov I.N. Snizhenie kolichestva obrazovavshikhsya promezhutochnykh soedineniy pri sintese sulfoferritnogo klinkera [Reduction of the Amount of Intermediate Phases Formed During the Synthesis of Sulfoferrite Clinker]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 12. Pp. 188–194. DOI: 10.12737/22803. (rus)

Information about the authors

Novosyolov, Alexey G. PhD, Associate professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Nikitina, Mariya A. Engineer. E-mail: mn111993@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Dreyer, Yulia I. E-mail: ershova.yulya10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Tarallo, Zakhar V. E-mail: tarallo.1998@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Manuilov, Vladimir E. PhD, Director of the Department of Technological Equipment Adjustment. E-mail: vmanujlov@yandex.ru. LLC «TP-ENGINEERING». Russia, 630102, Novosibirsk, Zyryanovskaya str., 63.

Received 21.11.2024

Для цитирования:

Новоселов А.Г., Никитина М.А., Дреер Ю.И., Таралло З.В., Мануйлов В.Е. Изучение влияния примесных соединений на фазообразование при синтезе кальциево-алюмоферритного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 107–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-107-116

For citation:

Novoselov A.G., Nikitina M.A., Dreer Yu.I., Tarallo Z.V., Manuylov V.E Study of the effect of impurity compounds on phase formation in the synthesis of calcium-alumoferrite clinker. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 107–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-107-116

18. Nikitina M.A., Borisov I.N., Timoshenko T.I. Otsenochная kharakteristika kachestva kal'tsievogo-alyuminatnogo tsementa s ispol'zovaniem tekhnogennykh materialov [Evaluative Characterization of the Quality of Calcium-Aluminate Cement Using Technogenic Materials]. ALITinform: Tsement. Beton. Sukhie smesi. 2020. No. 4(61). Pp. 16–25. (rus)

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-117-124

Трепалин Д.В., *Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru*

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМЗИТОВОГО ГРАВИЯ ПОЛУСУХИМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ И МАЛО ПЛАСТИЧНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. В современных условиях более правильным следует считать направление по видоизменению свойств керамзита, выпускаемого на керамзитовых заводах, и определить основные пути его возможного применения. Производство особо легкого керамзитового гравия имеет ряд технологических особенностей.

Одним из основных условий, необходимых для вспучивания глинистого сырья при обжиге, является образование пиропластической массы с оптимальными параметрами вязкости в относительно широком интервале температуры нагрева и выделения из этой массы достаточного количества газообразных продуктов. Степень вспучивания зависит от комплекса факторов, включающих качественный состав исходного сырья, режимы термообработки и физико-химические процессы.

Применение местной сырьевой базы позволяет расширить использование малопластичных глин как компонентов массы. Применение техногенных отходов (шлака, пылеунос из электрофилтра керамзитового производства) позволяет расширить интервал спекания глин местных месторождений (Ястребовское и Харлановское), а введение более пластичной глины позволяет сформировать гранулы полусухим способом. Лабораторные исследования показали, что использование более пластичной глины Пореченского месторождения (Тульская область), как добавки, позволяет получить легкий керамзит при температуре, начиная с 1140 °С. Основные характеристики полученного материала соответствуют ГОСТ 32496-2013.

Ключевые слова: керамзитовый гравий, способы формования, глина, пиритные огарки, пылеунос из электрофилтра керамзитового производства, насыпная плотность.

Введение. Керамические материалы являются главным приоритетом в индивидуальном жилищном строительстве. Эти материалы обладают высокими технико-эксплуатационными характеристиками, долговечностью, экологической чистотой. Не смотря на изменчивый спрос на керамические материалы, а также некоторые экономические и политические проблемы, остро стоит задача улучшения качества производимого материала и расширения ассортимента продукции для строительства зданий и других объектов. Керамзит давно завоевал славу лучшего тепло- и звукоизоляционного строительного материала. Применение керамзитового гравия, как строительного материала, не утратило своего значения, что дает возможность расширить области исследований при производстве керамического пористого заполнителя.

Исследования керамзитобетонных стеновых блоков в сравнении с силикатным и керамическим кирпичом показали, что их использование при строительстве зданий позволяет снизить теплопроводность на 10–67 %, массу стеновой конструкции на 25–29 %, затраты материалов на строительство 1 м³ – на 35–45 % [1]. Одним из путей решения данной проблемы является организация производства особо легкого керамзита с насыпной плотностью 200–250 кг/м³, что соот-

ветственно резко уменьшит его теплопроводность. Однако даже на таком керамзите при использовании стандартных технологий невозможно получение конкурентоспособных керамзитобетонных.

Сырьем для производства керамзита служат глинистые породы, которые относятся, в основном, к осадочным, такие как сланец, тонзиллит и т.д. Для производства керамзита наиболее пригодны монтмориллонитовые и гидрослюдистые глины, содержащие не более 30 % свободного кварца. Общее содержание SiO₂ не должно превышать 70 %, Al₂O₃ – не менее 12 %, Fe₂O₃ + FeO – до 10%, органические примеси – 1–2 %. Присутствие SiO₂ в больших количествах снижает пластические свойства глины; Al₂O₃ придает изделиям огнестойкость; Fe₂O₃ плавится в глине, что снижает ее температуру спекания и плавления, а также придает изделиям цвет; Fe₂O₃ в зависимости от количества в глине может снизить температуру ее спекания; CaO и MgO, равномерно распределенные в глинах, придают изделиям пористость и, следовательно, легкость и высокую водопоглощаемость, Na₂O и K₂O снижают температуру спекания глины [2].

Не смотря на широкое распространение месторождений глин их химический состав не всегда оптимален. По мере развития производства керамзита и совершенствования его технологии

все большее значение приобретают добавки – разнообразные вещества и материалы минерального и органического происхождения, находящиеся в различном агрегатном состоянии, которые вводятся в исходное сырье в процессе производства керамзита. Добавки используют для интенсификации физико-химических процессов при образовании гранул керамзита, повышения качества материала, роста производительности и снижения себестоимости продукции. Степень вспучиваемости исходного глинистого сырья определяет качество не только керамзита, но и качество строительных материалов на его основе [3]. Один из важных факторов, влияющих на температуру и интервал плавления, является химический состав глинистых пород, применяемых при производстве керамического гравия [4]. Он определяет вязкостную характеристику сырья, условия порообразования и вспучивания при обжиге. Химический состав оказывает большое влияние на изменение реологических свойств размягченной, доведенной до пиропластического состояния глинистой массы и дает возможность корректировать добавками глинистые массы для производства керамзита, при использовании мало вспучиваемого сырья.

Для улучшения процессов вспучивания в глинистых массах контролируют количество Fe_2O_3 . В качестве железосодержащих корректирующих добавок вводят различные компоненты: пиритные огарки, железная руда, нефтесодержащий шлам. Корректировка состава глинистого сырья по количеству свободного кварца, оксида железа и кальция может происходить при введении гальваношамов [2, 5]. В керамическую массу для производства керамзита вводили дизельное топливо, как органоминеральную добавку. Можно также использовать отходы углеобогащения.

Важнейшее из требований к сырью – вспучивание при обжиге. Вспучиваемость характеризуется коэффициентом вспучивания:

$$K_{вс} = \frac{V_k}{V_c},$$

где V_k – объем вспученной гранулы керамзита;

V_c – объем сухой сырцово-гранулы до обжига.

Характеризуется коэффициент соотношением объемов гранул после обжига к объему высушенных гранул при начальной термообработке при температуре $120^\circ C$.

Второе требование к сырью (в значительной степени связанное с первым) – легкоплавкость. Температура обжига должна быть не выше $1250^\circ C$, и при этом переход значительной части наиболее мелких глинистых частиц в расплав

должен обеспечить достаточное размягчение и вязкость массы. В противном случае, образующиеся при обжиге глины газы, не удерживаемые массой, свободно выйдут, не вспучив материал.

Для увеличения коэффициента вспучивания, в качестве источника углерода, в состав массы вводят такие добавки, как уголь, мазут, опилки и другие горючие добавки для увеличения образования газа при горении.

Процесс подготовки сырьевых материалов является важным этапом в технологической цепочке получения керамических гранул. Тонкое измельчение сырьевых материалов позволяет компонентам массы интенсивно взаимодействовать при спекании. Увеличение удельной поверхности частиц, при уменьшении их размера до 0,1 мм, позволяет компонентам массы равномерно распределяться по объему материала, что приводит к их плотному контакту. Распределение влаги и органической добавки осуществляется совместно при интенсивном перемешивании формовочной массы. Усреднение фракционного состава и образование гранул требуемого размера происходит в смесителе-грануляторе [6, 7].

Химический состав глинистых пород, применяемых при производстве керамзита – наиболее важный фактор, влияющий на температуру и интервал плавления материала. На рисунке 1 представлена диаграмма, позволяющая определить по химическому составу применение корректирующих добавок [4].

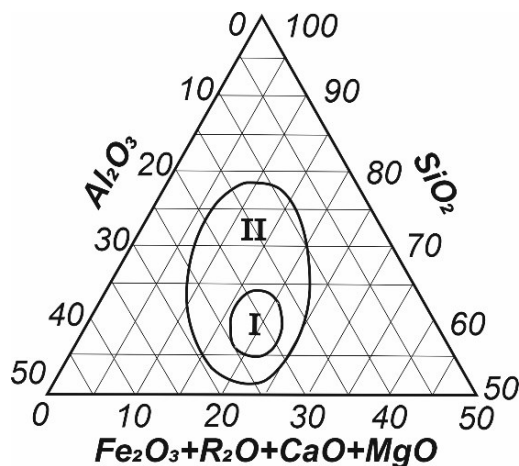
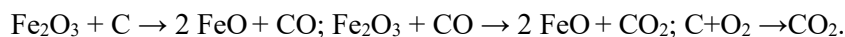
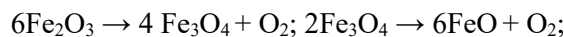


Рис. 1. Поля вспучивания глинистого сырья в тройной диаграмме [4]:

- I – область хорошей естественной вспучиваемости,
- II – область применения порообразователей

Введение в состав масс техногенных материалов влияет на образование стеклофазы и улучшает физико-механические свойства керамзитового гравия. Проводимые многими исследователями работы это подтверждают [8, 9]. Общее количество вводимых добавок составляет до 10 % от керамической массы.

Процесс обжига является основным при получении керамзитового гравия. Происходит вспучивание полуфабриката при температуре появления жидкой фазы. Количество расплава снижается при увеличении тугоплавких соединений [10, 11]. Основным условием, обеспечивающим вспучивание глинистых пород при нагревании,



При попадании в зону максимальной температуры, в изделиях резко возрастает количество жидкой фазы. Происходит уплотнение оболочки, в результате чего она становится газонепроницаемой, а будучи в припопластическом состоянии является способной к деформации без разрыва сплошности [12].

При недостатке в глинистом сырье окислов железа и при наличии достаточного количества органических примесей интенсивное вспучивание можно обеспечить введением таких добавок как: пиритные огарки, железной и болотной руды до оптимального количества. Введение жидких нефтепроизводных веществ образует органоминеральные комплексы с наличием сложных физико-химических явлений в структуре глинистых минералов. Шихты обладают хорошей пирохимической активностью. Оптимальное количество вводимых вспучивающих добавок составляет 0,5–2,0 % [13].

Отдельное использование корректирующих добавок позволяет получить продукт с заданными свойствами. Однако комплексное использование методов корректирования химического состава керамических масс для производства мелкофракционных заполнителей в литературе в полном объеме не освещено. Целью проводимых исследований комплексного влияния корректирующих добавок, является определение возможности управления формирования макроструктуры керамзитового гравия. Одной из главных задач разработки такой технологии является расширение сырьевой и компонентной базы для производства керамзитового гравия.

является совмещение во времени припопластического состояния глины с интенсивным газовыделением внутри обжигаемого материала [10]. Предварительный прогрев гранул позволяет органической составляющей в керамической массе нагреться до температуры вспышки и начала интенсивного разложения и окисления, перехода

Материалы и методы. Для анализа возможностей применения глинистого сырья Белгородской области для производства кармического пористого заполнителя были рассмотрены глины ближайших месторождений. На предприятии г. Белгорода АО «Завод ЖБК-1» производится керамический гравий по пластическому способу производства с использованием Ястребовской глины. Месторождение используется довольно долгое время, поэтому была рассмотрена возможность использовать глину другого близлежащего месторождения (Харлановского). Применение техногенных отходов (шлака, пылеунос из электрофилтра керамзитового производства АО «Завод ЖБК-1», г. Белгород, пиритные огарки АО «Аммофос», г. Череповец, Вологодская область) позволяет расширить интервал спекания глин местных месторождений, а введение более пластичной глины позволяет сформировать гранулы полусухим порошковым способом.

Глины Белгородской области обладают средней и малой пластичностью, что сказывается на вспучиваемости. При получении керамзитового гравия из местных глин в качестве глинистого сырья использовались – глины месторождений, расположенных в Белгородском районе, а также пластичные глины Пореченского месторождения (Тульская область) и Латненского месторождения (Воронежская область).

Химический состав всех используемых в исследовательской работе компонентов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав компонентов

Наименование компонента	Содержание в массе, %									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Ястребовская глина (№ 1)	66,70	0,85	12,50	5,19	3,78	1,39	2,08	0,57	0,22	6,40
Харлановская глина (№ 2)	69,10	0,91	13,60	5,66	1,34	1,47	2,10	0,49	0,10	4,88
Пореченская глина	48,80	0,74	22,90	9,73	2,61	1,87	3,36	0,13	0,03	9,51
Латненская глина	48,50	1,82	34,20	0,97	0,70	0,36	0,33	0,07	0,01	13,00
Пиритный огарок	20,80	0,20	4,25	58,20	1,62	1,04	0,47	0,49	4,15	4,44
Пылеунос из электрофилтра	64,99	0,82	19,21	5,71	2,64	2,93	2,2	0,56	0,13	–

Основная часть. Исследования проводились в 2 этапа. На первом этапе было необходимо выяснить, какая из рассматриваемых глин местных месторождений наиболее соответствует требованиям, предъявляемым к сырью для производства легкого и тяжелого керамического гравия. Для увеличения количества пиропластической составляющей в состав вводили пиритные

огарки (ПО), повышая количество железа в массе. Были определены свойства глин при вспучивании с применением и без корректирующих вспучивающих добавок.

Составы разработанных масс приведены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание компонентов в составах масс

Составы сырьевых масс	Содержание сырьевых компонентов, масс. %					
	Глина Ястребовская	Глина Харлановская	Глина Подгоренская	Глина ЛТ	ПО	ДТ
Состав 1	100,00	–	–	–	–	–
Состав 2	99,00	–	–	–	–	1,00
Состав 3	95,00	–	–	–	3,00	2,00
Состав 4	–	100,00	–	–	–	–
Состав 5	–	99,00	–	–	–	1,00
Состав 6	–	95,00	–	–	3,00	2,00

Введение ПО увеличивает образование жидкой фазы, что влияет на спекание гранул.

Были отформованы гранулы, которые обжигали при температуре 1140–1220 °С с шагом 20 °С и выдержкой при максимальной температуре в течении 10 мин, с предварительным подогревом 20 мин при температуре 400 °С. Затем го-

товые гранулы испытывали для определения физико-механических свойств полученных образцов.

В результате исследования были изучены основные физико-механические свойства. Одним из наиболее важных является насыпная плотность. Показатель насыпной плотности керамзитовых гранул приведен в таблице 3.

Таблица 3

(Насыпная) плотность гранул керамзита, кг/м³

Составы сырьевых масс	Температура вспучивания, °С				
	1140	1160	1180	1200	1220
Состав 1	860	807	719	546	498
Состав 2	687	566	465	435	401
Состав 3	906	825	653	546	487
Состав 4	1206	1118	955	740	705
Состав 5	532	446	390	340	336
Состав 6	1012	841	733	570	479

Исследования показали, что без введения каких-либо добавок глина Ястребовская месторождения вспучивается лучше, а насыпная плотность гранул в 1,2–1,4 раза ниже, чем у образцов из Харлановской глины. Введение в массу выгорающей добавки – дизельного топлива, позволяет Харлановской глине показать лучшие свойства по сравнению с Ястребовской глиной. При введении ПО + ДТ свойства практически выравниваются.

На втором этапе исследований в массы вводили пластичные глины, для улучшения формовочных свойств полуфабриката. Местные глины использовали в соотношении 1:1, т.к. предыдущие исследования показали схожесть обжиговых свойств при введении вспучивающей добавки.

Введение в массу дополнительно пластичной глины и корректирующей железосодержащей добавки позволяет расширить области исследований и разработки составов для производства керамического гравия. Применение пыли из электрофилтра керамзитового производства АО «Завод ЖБК-1», г. Белгород (ПЭ), решает проблему с утилизацией отходов в рамках программ по защите окружающей среды. Химический состав ПЭ идентичен составу обожженного из применяемых глин керамзита.

Разработанные для исследований составы приведены в таблице 4.

Были также отформованы гранулы, которые обжигали при температурах 1120–1220 °С с шагом 20 °С. Условия предварительной подготовки

гранул соответствуют предыдущей серии экспериментов. Далее были исследованы физико-ме-

ханические свойства полученных образцов. Показатель насыпной плотности керамзитовых гранул приведен в таблице 5.

Таблица 4

Содержание компонентов в составах масс

Составы сырьевых масс	Содержание сырьевых компонентов, масс. %						
	Глина Ястребовская	Глина Харлановская	Глина Подгоренская	Глина ЛТ	ПО	ДТ	ПЭ
Состав 7	35,00	35,00	19,00	–	8,00	1,00	2,00
Состав 8	35,00	35,00	24,00	–	3,00	1,00	2,00
Состав 9	37,00	37,00	20,00	–	3,00	1,00	2,00
Состав 10	39,50	39,50	15,00	–	3,00	1,00	2,00
Состав 11	35,00	35,00	–	20,00	7,00	1,00	2,00
Состав 12	39,00	39,00	–	10,00	9,00	1,00	2,00

Таблица 5

(Насыпная) плотность гранул керамзита, кг/м³

Составы сырьевых масс	Температура вспучивания, °С					
	1120	1140	1160	1180	1200	1220
Состав 7	294	246	234	234	277	297
Состав 8	381	301	263	219	206	229
Состав 9	434	330	298	239	238	202
Состав 10	362	272	232	227	219	240
Состав 11	544	417	362	304	241	218
Состав 12	512	440	358	335	295	329

Проведенные исследования показали, что введение в массу Пореченской глины позволяет получить легкий керамзит при низких температурах – 1120 °С, при введении в состав достаточно большого (до 8 %) количества ПО. Снижение количества ПО позволяет получить легкий керамический гравий при температуре 1160–1200 °С. Из данных приведенных в таблице 5 видно, что при введении в массу Латненской глины, при соблюдении тех же условий, наиболее легкий керамзит получается при температуре 1220 °С (состав 11). Все исследования проводились в соответствии с требованиями ГОСТ и технологических приемов [14, 15].

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что образцы на основе глины Ястребовского месторождения, без введения каких-либо добавок, вспучиваются уже при температуре 1140°С и соответствуют марке М800, а при температуре 1200°С – марке М500 в соответствии с ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия». Введение корректирующих и вспучивающих добавок (пиритные огарки, пылеунос из электрофилтра керамзитового производства) повышает коэффициент вспучивания глины в 2,5 раза, что, в свою очередь, снижает насыпную плотность.

При введении Пореченской глины, при температурах обжига 1140–1180 °С, полученные массы могут соответствовать марке М300 и

М200. Введение тугоплавких глин повлияло на изменение насыпной плотности готовой продукции: насыпная плотность снизилась с 544–512 кг/м³ до 218–329 кг/м³ при увеличении введения ЛТ-1.

Повышение температуры обжига до 1220°С позволило получить керамзитовый гравий с низкой насыпной плотностью готовой продукции. Образцы из местных глин с низким коэффициентом вспучивания, при использовании ряда корректирующих добавок (пиритные огарки, пылеунос из электрофилтра керамзитового производства, дизельного топлива), подходят для производства керамзитового гравия в Белгородской области и позволяют расширить ассортимент производимой продукции, от тяжелого керамзита до легкого.

Источник финансирования. Работа выполнена в БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030» (проект № СП1-5/3-2024 «Организация пилотного опытно-промышленного производства мелкофракционного легкого пористого заполнителя»), с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горин В.М., Токарева С.А., Сухов В.Ю., Нехаев П.Ф. Расширение области применения керамзитового гравия // Строительные материалы. 2003. № 11. С. 19–21.
2. Соколов Л.И., Фоменко А.И. Использование отходов в производстве керамзита // Экология и промышленность России. 2015. № 9. Т. 19. С. 30–34.
3. Нестерцов А.И. Расширение сырьевой базы производства керамзита // Строительные материалы. 1992. № 2. С. 21–22.
4. Каленов Е.М. Повышение качества керамзита. К.: Будівельник, 1984. 61 с.
5. Терехина Ю.В., Талпа Б.В., Котляр А.В. Минералого-технологические особенности литифицированных глинистых пород и перспективы их использования для производства строительной керамики // Строительные материалы. 2017. № 4. С. 16–19.
6. Патент № 2637966. Российская Федерация, МПК В01J2/10 (2006.01). Способ получения оптимизированного гранулята : № 2015142150/14: заявл. 18.03.2014 : опубл. 08.12.2017 / Нольд П. – 20 с
7. Патент № 2291126 Российская Федерация, МПК C03C 11/10 (2006.01). Способ получения гранулированного пеносиликата – пеносиликатного гравия : № 2005110360/03 : заявл. 11.04.2005 : опубл. 10.01.2007 / Кетов А.А., Пузанов И.С., Пузанов С.И., Пьянков М.П., Рассомагина А.С., Саулин Д.В. 13 с.
8. Василенко Т.А., Ламакина М.П. Физико-механические свойства керамзитового гравия, полученного с использованием электросталеплавильного шлака // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 187–196.
9. Василенко Т.А., Али Салех-Жафер. Применение кальцийсодержащих техногенных материалов в производстве керамзитового гравия // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. № 2. С. 106–113.
10. Роговой М.И. Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. М.: Стройиздат, 1974. 320 с.
11. Виноградов Б.Н. Петрография искусственных пористых заполнителей. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.
12. Чумаченко Н.Г. Влияние состава расплава и не растворившегося остатка на свойства керамзитового гравия // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 56–60.
13. Онацкий С.П. Производство керамзита. М.: Стройиздат, 1987. 333 с.
14. ГОСТ 32496-2013. Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия : межгосударственный стандарт : дата введения 2019-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. Изд. официальное. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
15. Будников П.П., Балкевич В.Л., Бережной А.С., Булавин И.А., Куколев Г.В., Полубояринов Д.Н. Химическая технология керамики и огнеупоров / под ред. П.П. Будникова, Д.Н. Полубояринова. М.: Стройиздат, 1972. 552 с.

Информация об авторах

Трепалин Дмитрий Викторович, аспирант кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Трепалина Юлия Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: yliaalin@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ковалев Сергей Викторович, старший преподаватель кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: k-ws@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.12.2024 г.

© Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В., 2025

Trepalin D.V., *Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V.
Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova
 *E-mail: mishinda.xtasm@yandex.ru

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF EXPANDED GRAVEL BY SEMI-DRY METHOD USING TECHNOGENIC WASTE AND LOW PLASTIC RAW MATERIALS

Abstract. *In modern conditions, it is more correct to consider the direction of modifying the properties of expanded clay produced at expanded clay factories, and to determine the main ways of its possible use. The production of extra-light expanded clay gravel has a number of technological features.*

One of the main conditions necessary for the swelling of clay raw materials during firing is the formation of a pyroplastic mass with optimal viscosity parameters in a relatively wide range of heating temperatures and the release of a sufficient amount of gaseous products from this mass. The degree of swelling depends on a set of factors, including the qualitative composition of the initial raw materials, heat treatment modes and physicochemical processes.

The use of local raw materials allows to expand the use of low-plasticity clays as components of the mass. The use of man-made waste (slag, dust from the electrostatic precipitator of expanded clay production of JSC «Zavod ZhBK-1», Belgorod, pyrite cinders of JSC «Ammophos», Cherepovets, Vologda Region) allows to expand the sintering range of clays from local deposits (Yastrebovskoye and Kharlanovsky), and the introduction of more plastic clay allows to form granules in a semi-dry way.

Laboratory studies have shown that the use of more plastic clay from the Porechenskoye deposit (Tula region) as an additive allows obtaining lightweight expanded clay at temperatures starting from 1140 °C. The main characteristics of the obtained material comply with GOST 32496-2013.

Keywords: *expanded clay gravel, molding methods, clay, pyrite cinders, dust removal from the electrostatic precipitator of expanded clay production, bulk density*

REFERENCES

1. Gorin V.M., Tokareva S.A., Sukhov V.Yu., Nekhaev P.F. Expanding the scope of expanded clay gravel [Rasshireniye oblasti primeneniya keramzitovogo graviya]. Construction materials. 2003. No. 11. Pp. 19–21.
2. Sokolov L.I., Fomenko A.I. Use of waste in expanded clay production [Ispolzovaniye otkhodov v proizvodstve keramzita]. Ecology and industry of Russia. 2015. No. 9. Vol. 19. Pp. 30–34.
3. Nestertsov A.I. Expansion of the raw material base for expanded clay production [Rasshireniye syryevoy bazy proizvodstva keramzita]. Construction materials. 1992. No. 2. Pp. 21–22.
4. Kalenov E.M. Improving the quality of expanded clay [Povysheniye kachestva keramzita]. K.: Budivelnik, 1984. 61 p.
5. Terekhina Yu.V., Talpa B.V., Kotlyar A.V. Mineralogical and technological features of lithified clay rocks and prospects for their use for the production of building ceramics [Mineralogo-tekhnologicheskiye osobennosti litifitsirovannykh glinistyykh porod i perspektivy ikh ispolzovaniya dlya proizvodstva stroitelnoy keramiki]. Construction materials. 2017. No. 4. Pp. 16–19.
6. Patent No. 2637966. Russian Federation, IPC B01J2/10 (2006.01). Method for producing optimized granules [Sposob polucheniya optimizirovannogo granulyata]: No. 2015142150/14: declared. 18.03.2014: published. 08.12.2017 / Nold P. 20 p.
7. Patent No. 2291126 Russian Federation, IPC C03C 11/10 (2006.01). Method for producing granulated foam silicate – foam silicate gravel [Sposob polucheniya granulirovannogo penosilikata – penosilikatnogo graviya]: No. 2005110360/03: declared 11.04.2005: published 10.01.2007 / Ketov A.A., Puzanov I.S., Puzanov S.I., Pyankov M.P., Rassomagina A.S., Saulin D.V. 13 p.
8. Vasilenko T.A., Lamakina M.P. Physicochemical properties of expanded clay gravel obtained using electric steelmaking slag [Fiziko-mekhanicheskiye svoystva keramzitovogo graviya, poluchennogo s ispolzovaniyem elektrostaleplavilnogo shlaka]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. P. 187–196.
9. Vasilenko T.A., Ali Saleh-Zhafer Application of Calcium-Containing Man-Made Materials in the Production of Expanded Clay Gravel [Primeneniye kaltsiysoderzhashchikh tekhnogennykh materialov v proizvodstve keramzitovogo graviya]. Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. 2015. No. 2. P. 106–113.
10. Rogovoy M.I. Technology of Artificial Porous Fillers and Ceramics [Tekhnologiya iskusstvennykh poristyykh zapolniteley i keramiki]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 320 p.
11. Vinogradov B.N. Petrography of Artificial Porous Fillers [Petrografiya iskusstvennykh poristyykh zapolniteley]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 136 p.

12. Chumachenko N.G. Effect of Melt Composition and Undissolved Residue on the Properties of Expanded Clay Gravel [Vliyaniye sostava raspava i ne rastvorivshegosya ostatka na svoystva keramzitovogo graviya]. Construction Materials. 2013. No. 1. Pp. 56–60.

13. Onatsky S.P. Production of expanded clay [Proizvodstvo keramzita]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 333 p.

14. GOST 32496-2013. Porous fillers for lightweight concrete. Specifications [Zapolniteli poristyye dlya legkikh betonov. Tekhnicheskiye

usloviya]: interstate standard: date of introduction 2019-07-01 / Federal Agency for Technical Regulation. - Official ed. - Moscow: Standartinform, 2014. 12 p.

15. Budnikov P.P., Balkevich V.L., Berezhnoy A.S., Bulavin I.A., Kukolev G.V., Poluboyarinov D.N. Chemical technology of ceramics and refractories [Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneuporov]. edited by P.P. Budnikov, D.N. Poluboyarinov. Moscow: Stroyizdat, 1972. 552 p.

Information about the authors

Trepalin, Dmitry V. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: extrepalin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Mishin, Dmitry A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Trepalina, Yulia N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: yliaalin@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Kovalev, Sergey V. Senior Lecturer, Department of Cement and Composite Materials Technology. E-mail: kws@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 19.12.2024

Для цитирования:

Трепалин Д.В., Мишин Д.А., Трепалина Ю.Н., Ковалев С.В. Разработка технологии производства керамзитового гравия полусухим способом с использованием техногенных отходов и мало пластичного сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 117–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-117-124

For citation:

Trepalin D.V., Mishin D.A., Trepalina Yu.N., Kovalev S.V. Development of technology for production of expanded gravel by semi-dry method using technogenic waste and low plastic raw materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 117–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-117-124

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135

Лукьянов Е.А., *Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б.

Донской государственный технический университет

*E-mail: mpebiser@gmail.com

СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Аннотация. Определение параметров пространственной ориентации объектов представляет собой актуальную проблему и имеет важнейшее значение для различных отраслей науки и техники. В большинстве случаев это осуществляется с помощью информационно-измерительных систем, измеряющих положение, ориентацию и параметры движения управляемого объекта. Мобильные робототехнические системы широко используют методы инерциальной навигации. Отладка таких систем обычно требует создания испытательного стенда и экспериментального тестирования разработанных решений инерциальной навигации. Сократить временные и финансовые затраты при проектировании и разработке систем, использующих инерциальную навигацию, возможно, если большую часть экспериментов и проверок выполнять на основе математической модели. Поэтому, методы построения виртуальных датчиков для моделирования пространственного движения робототехнических систем представляют интерес, как и практическое применение таких датчиков при исследовании робототехнических систем.

Статья посвящена решению задач создания виртуального датчика для инерциальной навигации, содержащего трехкоординатные акселерометры и гироскопы в среде моделирования CoppeliaSim. Выполнена проверка работы такого датчика в тестовых примерах с линейными и вращательными перемещениями, оценены ошибки определения таким датчиком ускорений и угловых скоростей.

Ключевые слова: мобильный робот, манипулятор, гироскоп, акселерометр, обработка сигналов, математическая модель

Введение. Определение пространственной ориентации роботов, их рабочих органов является необходимой задачей, решаемой системой управления роботом. Для этого могут использоваться различные методы [1]. Основными недостатками оптических методов являются необходимость должного освещения и организации внешней среды, а также потребность в значительных вычислительных ресурсах. Определение пространственного положения легко реализуется при использовании датчиков, имеющих кинематические связи с «неподвижными» и «перемещающимися» звеньями. Однако, если устройство перемещается в пространстве по сложной траектории, применение «контактных методов» невозможно. Именно это определяет проблему измерения параметров ориентации и движения тел в пространстве [2]. В этом случае ориентация объектов и параметры их перемещения могут быть определены на основе методов инерциальной навигации [2–4]. На основе датчиков ускорения и гироскопов [5, 6], можно решать задачи оценки пространственной ориентации и перемещения объекта [7]. В зависимости от специфики и особенностей мобильных устройств, подход к решению этих задач сенсорно-информационной подсистемой может быть различным [8, 9], как и алгоритмы вычислений [10–12].

Известно [12], что методы вычисления линейных и угловых перемещений на основе измерения ускорений и угловых скоростей обладают методическими, расчетными и измерительными погрешностями. Минимизация этих погрешностей обеспечивается как на этапах проектирования, так и на этапах отладки и тестирования. Есть часть задач обеспечения точности сенсорно-информационной системы, связанная с датчиками, их сигналами и начальной обработкой этих сигналов (смещения, линеаризация и пр.). Есть часть задач, связанная с алгоритмическим обеспечением процесса определения положения, ориентации и перемещений тел. Какие-то из этих задач могут быть решены только в составе реальной измерительной системы, установленной на объекте, движение и ориентацию которого требуется контролировать [12]. Другие могут решаться с использованием макетов или экспериментальных стендов. Однако, проектирование и изготовление стенда для отладки разрабатываемого программно-аппаратного комплекса требует значительных финансовых и временных затрат. Поэтому эффективным может являться применение методов исследования и проектирования на основе виртуального моделирования [13].

Сократить затраты и время разработки возможно при использовании виртуальных стендов и моделей реальных устройств [13]. Виртуальная

модель должна соответствовать физическому объекту и быть оснащена необходимыми датчиками. В этом случае алгоритмы и программы, разработанные и проверенные на виртуальной модели можно использовать в реальном устройстве. В данной статье рассматривается разработка сенсорной подсистемы для определения пространственной ориентации и угловых перемещений объекта.

Методы, оборудование, материалы. В качестве материалов при подготовке данной статьи были использованы публикации об исследованиях в области навигации и управления робототехническими системами, статьи о решении задач инерциальной навигации в реальных мобильных и промышленных роботах, а также результаты собственных работ по созданию элементов и программного обеспечения для систем инерциальной навигации. Используемые методы – методы математического моделирования физических систем линейного и вращательного движения, решения дифференциальных уравнений пространственного движения твердых тел и оценки погрешности результатов математического моделирования. Программные средства, использованные при проведении исследований, результаты которых изложены ниже – пакеты CoppeliaSim и Matlab.

Объект исследования, цели и задачи исследования. Целью исследования являлось создание виртуального датчика, позволяющего при моделировании робототехнических и других систем, реализующих координатные перемещения, моделировать системы инерциальной навигации. Для этого решены задачи разработки трехкоординатных датчиков ускорений и трехкоординат-

ных датчиков угловых скоростей, разработки алгоритмов, вычисляющих значения гироскопов и акселерометров, экспериментальной проверки точности значений виртуального датчика. Объектом исследования является процесс движения звеньев робота (твердых тел) и процесс измерения действующих ускорений и угловых скоростей посредством виртуального датчика.

Основная часть.

Выбор среды моделирования. Выбор среды моделирования [14, 15] осуществлялся на основе таких критериев, как наличие и возможность использования виртуальных датчиков, точность моделирования процессов движения твердых тел, наличие различных решателей систем дифференциальных уравнений. В настоящее время CoppeliaSim является одним из лучших симуляторов [15], обладает развитыми средствами интеграции моделей с внешними программно-аппаратными решениями.

Создание 3D модели стенда. Среда CoppeliaSim имеет инструменты [16–18] для создания объектов любой сложности. Однако, более удобным является объединение возможностей конструкторской САПР и среды моделирования. В этом случае в системе автоматического проектирования создается устройство, представляющее собой сборку из нескольких деталей, способных перемещаться друг относительно друга. Эта сборка экспортируется в формате **urdf** (*universal robotic description format*) [18]. Этот файл импортируется в CoppeliaSim как виртуальная модель устройства. На рисунке 1 показан результат создания виртуального стенда для исследования возможностей систем инерциальной навигации.

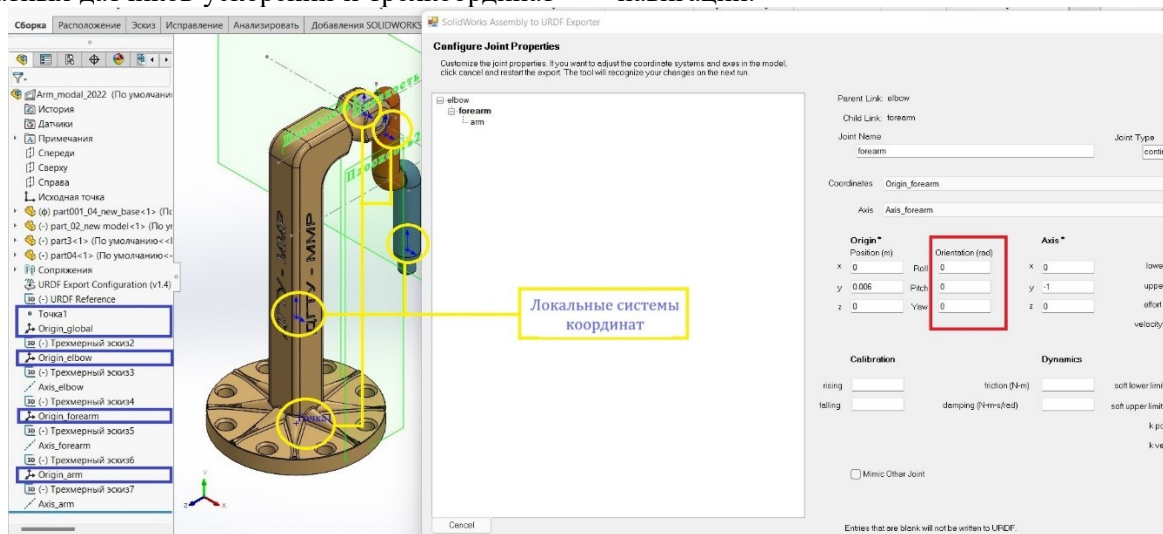


Рис. 1. Виртуальный стенд, полученный из urdf-сборки

После расположения «вручную» виртуальных двигателей и датчиков, модель может использоваться для экспериментов.

Построение виртуального акселерометра. Акселерометр – это устройство (датчик), измеряющий полное ускорение, поэтому даже если

устройство статично, оно будет измерять гравитационное ускорение [19]. На рис. 2 представлен

типовой акселерометр, измеряющий силы взаимодействия шарика, обладающего массой со стенками датчика.

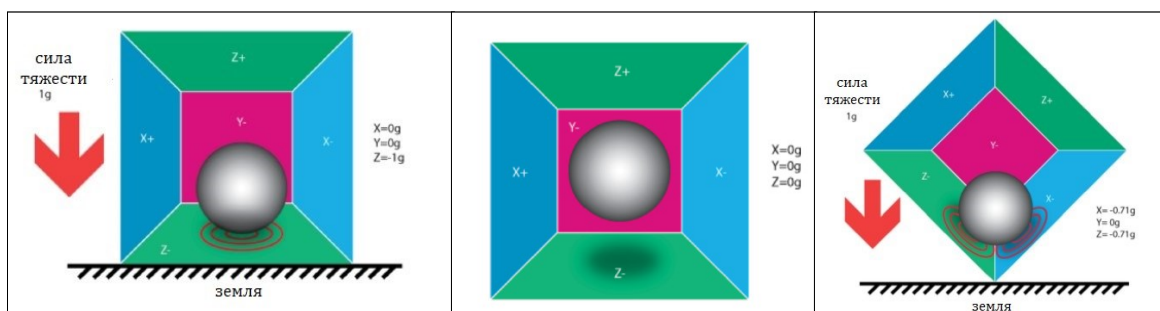


Рис. 2. Представление акселерометра: (а) в неподвижном состоянии, (б) в свободном падении, (в) при повороте на 45 градусов

Общий вектор ускорения, измеряемый датчиком, содержит как гравитационное составляющую, так и ускорения от движения датчика.

В CoppeliaSim датчик ускорения может быть создан с использованием трехкоординатного датчика (рис. 3), который измеряет силы, действующие на пробную массу.

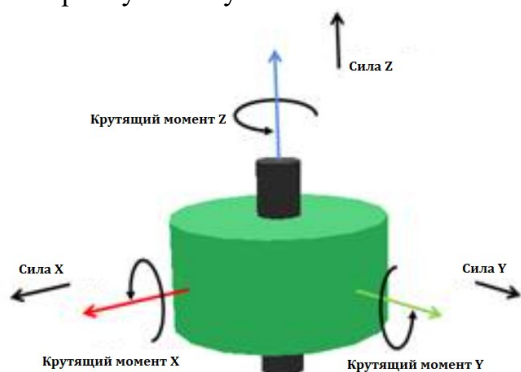


Рис. 3. Ориентация осей при измерении действующих сил и моментов

На значения сил, действующих вдоль трех координатных осей, можно рассчитать ускорения, зная массу, закрепленную на датчике. Примем массу, использованную в датчике, равной 1 г, тогда ускорение объекта определится следующим образом

$$acc = \frac{F}{m}; \quad (1)$$

где acc – ускорение в m/c^2 , F сила в [Н] и m масса в [кг].

Трехкоординатный датчик ускорений на основе датчика сил, созданный в CoppeliaSim при тестировании показал значительные ошибки измерения ускорений. Это обнаружено при моделировании характерных процессов разгона/свободного падения/торможения как при однокоординатном перемещении, так и при одновременном движении по нескольким координатам. Таким

образом построение виртуальных датчиков ускорения в пакете CoppeliaSim на основе датчиков сил авторами не рекомендуется.

Дальнейшие исследования выполнялись с использованием виртуального трехкоординатного датчика ускорений, построенного на основе анализа изменения скоростей тела (основания) датчика.

Пусть v_0 и v_1 – два вектора скорости датчика, полученные за интервал времени dt в глобальной системе координат, gR – матрица вращения системы координат датчика относительно глобальной системы координат, а g – вектор действующего гравитационного ускорения. Вектор ускорения датчика acc в системе координат датчика (вдоль его осей) будет:

$$a = \frac{dv}{dt}; \quad (2)$$

$$a_{glob} = a + g; \quad (3)$$

$$acc = {}^gR^{-1} * a_{glob}; \quad (4)$$

где a – вектор ускорения линейного перемещения датчика в глобальной системе координат;

acc – вектор ускорения, измеренный датчиком в его системе координат.

Программный скрипт, вычисляющий численные значения ускорений в проекции на координатные оси виртуального датчика, выполняет преобразования в соответствии с уравнениями 2–4 с интервалом времени вычислений, совпадающим с интервалом времени моделирования.

Построение виртуального гироскопа. В CoppeliaSim имеется возможность с помощью программного интерфейса получать текущие значения угловых скоростей объектов сцены в глобальной системе координат. Гироскоп – это датчик для измерения угловой скорости вращающихся объектов, осуществляемый в локальной системе координат датчика [20]. При моделировании систем инерциальной навигации нужен

виртуальный гироскоп, «сигнал» которого соответствовал бы скорости вращения «корпуса датчика» относительно осей системы координат, связанной с датчиком.

При создании виртуального датчика использован метод вычисления угловых скоростей твердого тела на основе изменения его пространственного расположения [20, 21]. Предположим,

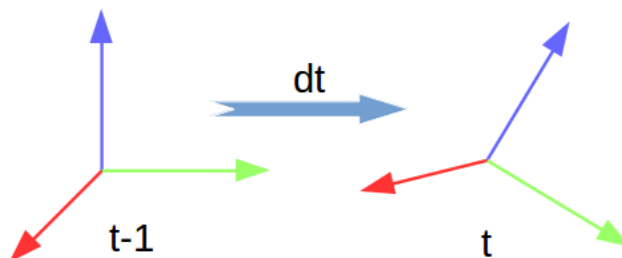


Рис. 4. Изменение пространственной ориентации объекта в процессе моделирования

Для любого объекта сцены [18, 19] можно получить матрицу вращения в текущем моменте времени.

$$R = Rz(\psi) \cdot Ry(\theta) \cdot Rx(\varphi); \quad (5)$$

где R – матрица вращения, $Rx(\varphi)$, $Ry(\theta)$, $Rz(\psi)$ – матрицы вращения вокруг осей X, Y и Z соответственно.

Зная изменения значений матрицы вращения в последовательные моменты времени моделирования, можно получить углы Эйлера [21, 22], определяющие пространственную ориентацию тела в текущий момент времени. На рисунке 5 показано изменение на интервале времени dt пространственного положения некоторого тела, описываемое матрицей поворота.

Для представленной ситуации, если известны матрицы вращения ${}^0_A R$ и ${}^0_B R$, ${}^A_B R$, пространственное положение тела в глобальной системе координат или в системе координат другого тела может быть получено следующим образом:

$${}^0_B R = {}^0_A R * {}^A_B R; \quad (6)$$

$${}^A_B R = {}^0_A R^{-1} * {}^0_B R; \quad (7)$$

где ${}^0_A R$ – матрица вращения системы координат (A) относительно (0), ${}^0_B R$ – матрица вращения

$$\omega_x = (\psi(t) - \psi(t-1))/dt, \omega_y = (\theta(t) - \theta(t-1))/dt, \omega_z = (\varphi(t) - \varphi(t-1))/dt.$$

Полученные скорости вращения определены в системе координат датчика, что и требуется для модели реального датчика.

Для проверки работоспособности виртуального гироскопа, выполним моделирование движения тела под действием известных вращающих моментов. В этом случае сможем сравнить результаты, полученные аналитически с результатами экспериментальными. Движение тела под действием постоянного момента описывается следующим образом:

$$\omega = \omega_0 + \frac{M_{max}}{I} dt; \quad (8)$$

в процессе моделирования в момент времени $t-1$ объект занимает определенное положение, описываемую углами Эйлера $\varphi(t-1)$, $\theta(t-1)$, $\psi(t-1)$. Через интервал времени моделирования dt тело займет положение $\varphi(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$ (рис. 4).

системы координат (B) относительно (0) и ${}^A_B R$ – матрица вращения системы координат (B) относительно (A).

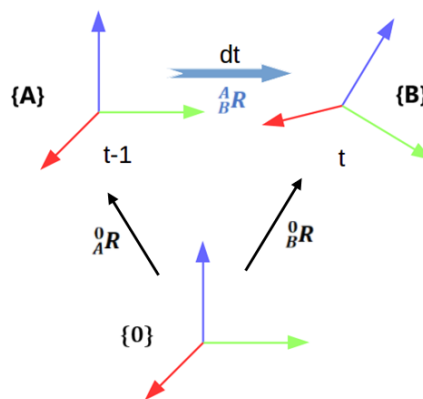


Рис. 5. Изменения ориентации «виртуального» датчика на интервале моделирования

Зная матрицу ${}^A_B R$, можно вычислить углы Эйлера, определяющие изменение углового положения тела за интервал времени dt . При этом скорости вращения ω_x , ω_y , ω_z «виртуального датчика» относительно осей координат определяются как:

$$t = \frac{I\omega}{M_{max}}; \quad (9)$$

где t – время разгона [с];

I – момент инерции тела вокруг оси вращения [кг·м²];

M_{max} – крутящий момент, действующий на тело [Нм];

ω_0 – начальная угловая скорость [рад/с];

ω – угловая скорость [рад/с].

Изменяя параметры проведения виртуальных экспериментов, проведем оценку возможных погрешностей разработанных гироскопов и акселерометров.

Описание моделей и программ. Целью экспериментов было получение значений трехкоординатного акселерометра и трехкоординатного гироскопа как в статических сценах, при различной ориентации датчиков, так и в динамике – на этапах ускоренных и установившихся движений. Для экспериментов в CoppeliaSim были построены виртуальные модели в соответствии с требованиями эксперимента. Разработанное программное обеспечение позволяло управлять по-

ложениями и движениями звеньев модели. Значения, получаемые при моделировании с гироскопов и акселерометров, записывались в файл для их последующей обработки и анализа [22].

Результаты экспериментов, выводы.

а. Анализ данных датчиков в различных положениях системы (статика). На рисунке 6 показано положение звеньев манипулятора при проведении эксперимента. Виртуальные датчики ускорения и угловой скорости установлены на «предплечье» и на «плече».

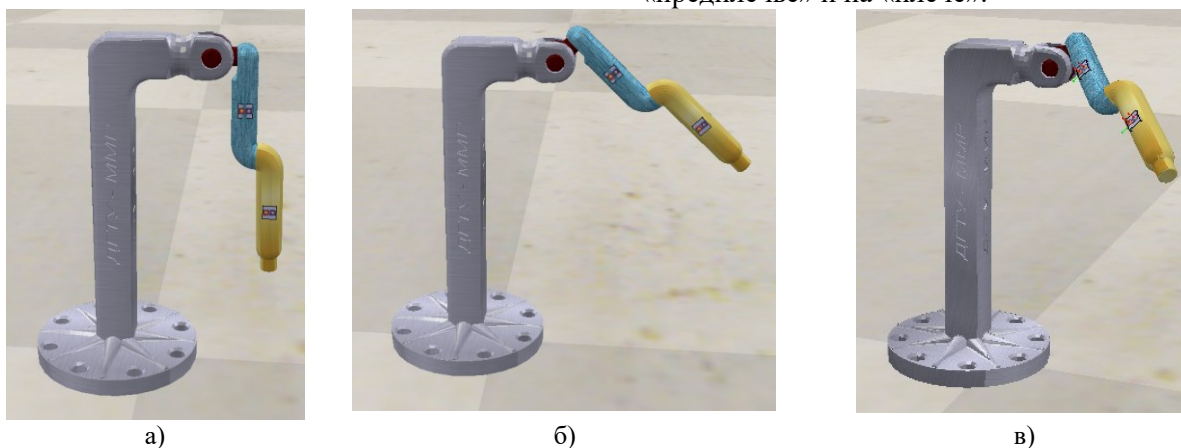


Рис. 6. Статические положения звеньев манипулятора для проверки значений акселерометров и гироскопов

На рисунке 7 показаны «сигналы» датчиков в разных положениях. Скорости перемещения звеньев при переходе из одного положения (позы) в другую выбраны малыми для того, чтобы сделать центростремительное ускорение

пренебрежимо малым. Поэтому изменение ускорений, показанное на графиках, соответствует распределению гравитационного ускорения по трем осям датчика.

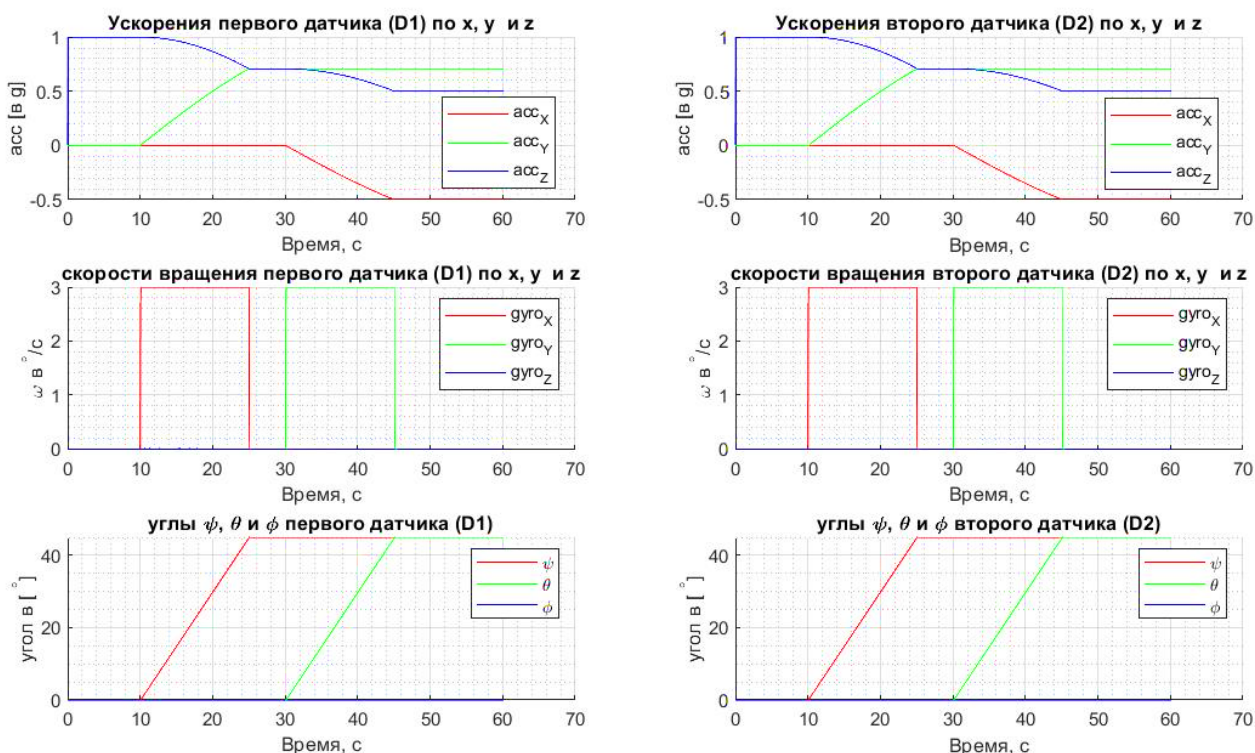


Рис. 7. Значения измеренных значений угловых скоростей и ускорений датчиков D1, D2 в положениях а, б, в

Как видно (рис. 7), при вращении вокруг одной оси гравитационная составляющая

пропорционально распределяется по двум другим перпендикулярным осям. Например, при

вращения (время от 25 до 30 секунд) на угол 45 градусов вокруг оси X получилось значение $0,71g$ по каждой из двух других осей (рис. 2в, 6б и 7).

На рисунках можно выделить несколько зон, в каждой из которых происходит изменение положения модели или звенья находятся в статичном состоянии. На интервале 0–10 секунд модель статична, на интервале 10–25 секунд модель происходит движение с угловой скоростью 3 град/с вокруг оси X (переход от позы рис. 6а к рис. 6б). Сравнивая значения ускорений, измеряемых акселерометрами в процессе

эксперимента, было установлено, что виртуальные датчики ускорения обладают ошибкой порядка $1e^{-4}$ м/с², а погрешность гироскопов не превышала величины $5e^{-4}$ рад/с.

б. При проведении второго эксперимента (вертикальный подъем и свободное падение тела) виртуальная модель, представляла собой твердое тело (куб), имеющий массу 5кг. Регистрировались значения ускорений и угловых скоростей тела в статическом его положении и при ускоренном движении. Цель эксперимента – оценка ошибок виртуальных датчиков при ускоренных линейных движениях.

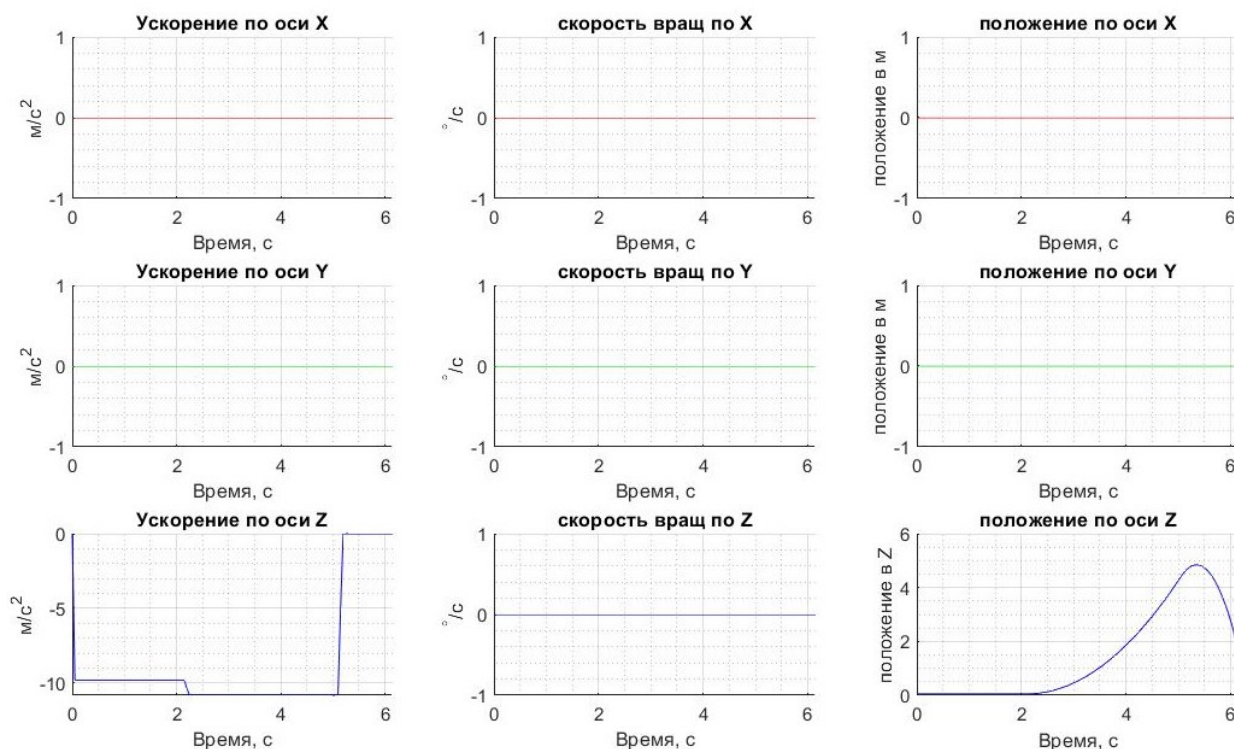


Рис. 8. Результаты эксперимента вертикального подъема и свободного падения

На графике изменения ускорений видно, что на интервале времени от 0 до 2.5 секунд датчик находится в покое – регистрируемое им ускорение равно $-g$, значения гироскопов равны 0 – вращений не происходит. После $t=2.5$ с под действием внешней силы $F_z = 54.05$ н на массу 5кг происходит ускоренное движение тела вверх. При этом ускорение, регистрируемое датчиком, составляет $a_z = 1.1g$. Движение вверх с этим ускорением происходит до момента времени $t=5$ секунд. После чего внешняя сила исчезает, а тело начинает свободное падение, при котором регистрируется действующее ускорение $a_z = 0$ (рис. 2б и рис. 8 от 5 с). В течение всего этого эксперимента вращательных движений не происходило. Изменения положения тела в

процессе эксперимента также показаны на рисунке 8.

В данном эксперименте установлено, что возникающие ускорения корректно измеряются виртуальным датчиком и ошибка измерения не превышала $1e^{-5}$ м/с².

с В следующем эксперименте датчик расположен на расстоянии 0,75 м от оси вращения тела, которое вращается с постоянной угловой скоростью $\pi/4$ рад/с. Оси датчика сориентированы с осями глобальной системы координат (рис. 9). Цель эксперимента – определить наличие и величину ошибки измерения угловых скоростей виртуальных гироскопов при вращении относительно оси Z.

На рисунке 10 показано изменение значений (сигналов) виртуальных датчиков угловых скоростей и ускорений во время эксперимента.

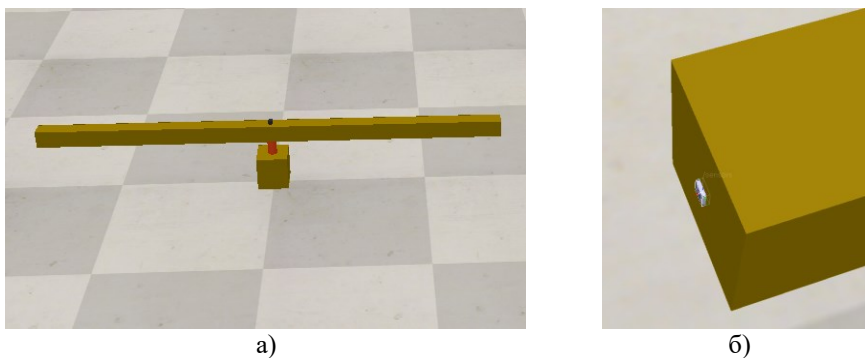


Рис. 9. Виртуальный стенд и положение датчика

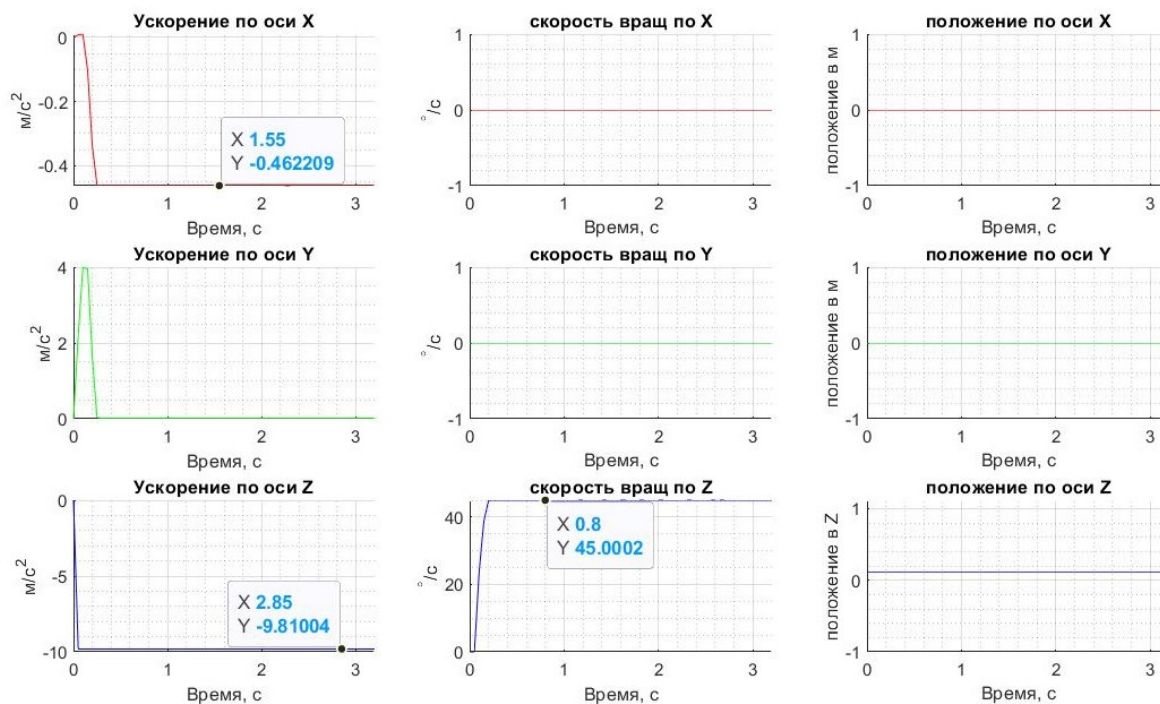


Рис. 10. Результат вращения вокруг оси z

При постоянной угловой скорости возникает радиальное ускорение $a_r = -r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$, в данном случае его расчетное значение равно 0.463 м/с^2 . Значения, полученные датчиком, соответствуют расчетным значениям, с погрешностями не более 1e^{-4} как для ускорений, так и для угловых скоростей.

с. В этом эксперименте использовалась та же модель, как и на рисунке 9. Целью эксперимента являлось определить погрешности измере-

ния параметров движения, при ускоренном вращательном движении тела. Полученные экспериментально значения сравнивались с расчетными. Результаты приведены в таблице 1. Размеры вращающегося тела $1,5 \text{ м} \times 0,05 \text{ м} \times 0,05 \text{ м}$, момент инерции $I = 0.265 \cdot m \text{ [м}^2\text{кг]}$. Масса тела в эксперименте изменялась, как и действующий вращающий момент. Скорость, разгон до которой осуществлялся средой моделирования, указана в таблице.

Таблица 1

Результаты экспериментов для определения погрешности между временем разгона в CorrelliaSim и аналитическим расчетным временем разгона

№	$M_{max} \text{ [Нм]}$	$\omega \text{ [}^\circ/\text{с]}$	$m \text{ [кг]}$	Расчётное время в [с] $t = \frac{I\omega}{M_{max}}$	Полученное время в copelliasim $t \text{ [с]}$	Погрешность времени разгона $dt[\text{с}]$
1	5	45	10	0.417	0,399	0.018
2	5	45	5	0,208	0,2	0,008
3	5	30	5	0,138	0,15	0,012
4	15	90	5	0,138	0,15	0,012
5	15	45	10	0,138	0,15	0,012
6	15	30	20	0,185	0,2	0,015

На рисунке 11 показаны данные эксперимента, выполнявшегося для проверки виртуального гироскопа.

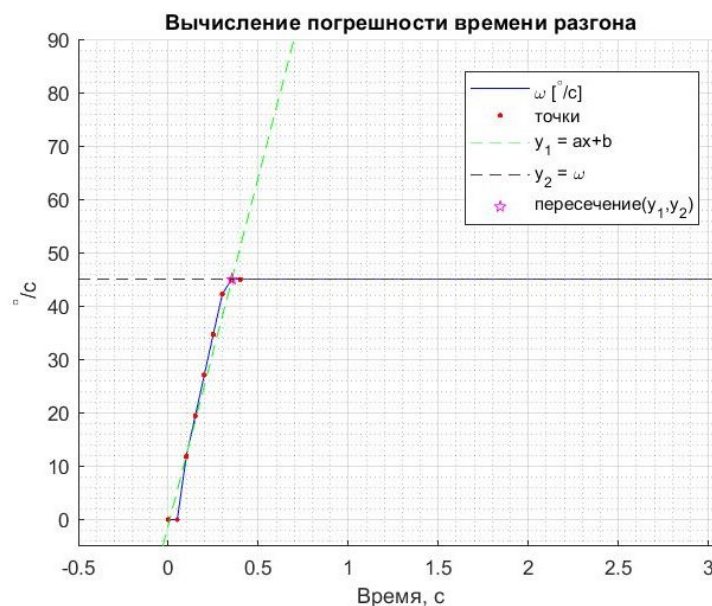


Рис. 11. Время разгона и линейная регрессия для точек во время разгона

Для компенсации ошибок определения времени окончания разгона выполнялась линеаризация скорости вращения на этапе разгона. Уравнение прямой y_1 (линейная регрессия) пересекается с линией заданного значения скорости (рис. 11) в некоторый момент времени. Полученное теоретическое время разгона и время разгона, определенное из эксперимента, позволяют оценить ошибку применения виртуальных гироскопов в динамической системе на примере окончания переходного процесса.

Выводы. Выполненная разработка и тестирование виртуальных акселерометров и гироскопов позволяют сделать следующие выводы:

1. Современные среды физического моделирования робототехнических систем имеют программный инструментарий, используя который возможно создание оригинальных виртуальных датчиков. В пакете CoppeliaSim разработанные авторами трехкоординатные акселерометры и гироскопы могут использоваться для решения задач инерциальной навигации при моделировании и исследовании реальных систем.

2. Применение виртуальных датчиков должно осуществляться после проверки их сигналов реально ожидаемым. Как и любая математическая модель разработанные датчики могут иметь ограниченную область измеряемых ускорений и угловых скоростей. При превышении допустимых значений адекватность модели не

обеспечивается, и ошибка может быть значительной.

3. Проведенные эксперименты показали результаты, позволяющие использовать разработанные виртуальные датчики для моделирования и исследования систем инерциальной навигации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алешкин В.В., Здражевский Р.А., Голованов П.Н., Марусич В.О. Методы и алгоритмы коррекции кинематических уравнений в задаче определения ориентации объекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Том 22, № 9. С. 494–504. DOI: 10.17587/mau.22.494-504
2. Robert B., Krzysztof J. Determining of an object orientation in 3D space using direction cosine matrix and non-stationary Kalman filter // Archives of Control Sciences. 2016. Vol. 26. No. 2. Pp. 223–244. DOI: 10.1515/acsc-2016-0013
3. Алексей Г. Применение МЭМС-технологии в навигации // компоненты и технологии. 2014. Том 153, № 4. С. 65–69.
4. Бутаков Н.А. Применимость инерциальных систем навигации в мобильных устройствах // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Vol. 2 (5).
5. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О., Трубин В.Г., Трубин М.В. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. 2018. Том 25, № 3. С. 9–22.
6. Liang X., Xiaochi H., Yuanyuan Y., Ao S.,

Xuan Y., Jiabin D., Shuai D. Research on IMU-Based Motion Attitude Acquisition and Motion Recognition // IEEE Sensors Journal. 2024. Vol. 24, Iss. 13. Pp. 20786–20793. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3394903

7. Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б. Оценка ошибок инерциальной навигации от параметров движения объекта // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. С. 820–821.

8. Маммадов А.З. Модель инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки. 2021. Том 86, № 5. С. 5–9. DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11683

9. Вагнер Й.Ф. Об измерении параметров движения спортсменов с помощью гироскопов и акселерометров. Технические аспекты // Гироскопия и навигация. 2017. Том 25, № 3. С. 3–31. DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.3.003-031

10. Kristel C., Leonardo B. A Comparative Analysis of Sensor Fusion Algorithms for Miniature IMU Measurements // International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. 2023. Pp. 239–244. DOI: 10.1109/ISITIA59021.2023.10220994

11. Abdullah E O., Mustafa E.A. A Practical Implementation of a Low-Cost 6-DOF IMU by Kalman Algorithm // European Journal of Science and Technology. 2021. Iss. 32. Pp. 167–170. DOI: 10.31590/ejosat.1040765

12. Sebastian O.H., Samuel W., Ruth T., Jane B., Christos K., Ravi V. An Extended Complementary Filter for Full-Body MARG Orientation Estimation // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2020. Vol. 25, Iss. 4. Pp. 2054–2064. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2992296

13. Rabab B., Laszlo D., Gyorgy K. Simulation and trajectory optimization of collaborating robots by application of solidworks and matlab software in industry 4.0. // Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2020. Vol. 18, iss. 4.

14. Mikhail I., Stanislav M., Sergei S. Robot description formats and approaches: Review // International Conference «Nonlinearity, Information and

Robotics» (NIR). 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/NIR52917.2021.9666120

15. Andrew F., Jie W., Joshua A.M. How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion // ScienceDirect (Elsevier). 2022. Vol. 120. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102629

16. Zander B., Manuel L. Scripting Farming Simulator with Lua: Unlocking the Virtual Fields // Springer Nature. 2023. Pp. 45–83. DOI: 10.1007/979-8-8688-0060-3

17. Yan Z., Bin F., Guofeng Z., Xueming B. The Application of CoppeliaSim EDU in Robot Course Teaching // Journal of Education and Educational Research. 2024. Vol. 7. No. 1. DOI: 10.54097/as82qn67

18. Daniella T., Peter C. Understanding URDF: A Dataset and Analysis // IEEE Robotics and Automation Letters. 2024. Vol. 9, Iss. 5. Pp. 4479–4486. DOI: 10.1109/LRA.2024.3381482

19. Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Использование акселерометра ADXL335 для определения угла отклонения от вертикали // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2. С. 68–72.

20. Матвеев В.В., Кисловский Е.Ю., Мильченко Д.Н., Распопов В.Я., Телухин С.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Том 20, № 7. С. 437–442. DOI: 10.17587/mau.20.437-442

21. Eric R., Surya P., Marc F. CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520

22. Солонина А.И., Клионский Д.М., Меркучева Т.В., Перов С.Н. Цифровая обработка сигналов и MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.

Информация об авторах

Лукьянов Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники. E-mail: lukevgan@gmail.com. SPIN РИНЦ: 1047-6600. ORCID: 0000-0002-6363-6511. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

Мпенгеле Эрик Бисамба, аспирант, кафедра робототехники и мехатроники. E-mail: mpebiser@gmail.com. ORCID: 0009-0005-7500-5978. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

Алхалили Алак Сабах Бадри, аспирант, кафедра робототехники и мехатроники. E-mail: alaqsabah@yahoo.com. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

Поступила 25.10.2024 г.

© Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б., 2025

Lukyanov E.A., *Mpengele E.B., Alkhalili Alak S.B.

Don State Technical University

*E-mail: mpebiser@gmail.com

CREATION OF A VIRTUAL SENSOR FOR MODELING INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

Abstract. Determination of spatial orientation parameters of objects is an actual problem and is of crucial importance for various branches of science and technology. In most cases, this is done with the help of information-measuring systems that measure the position, orientation, and motion parameters of the controlled object. Mobile robotic systems widely use methods of inertial navigation. Debugging of such systems usually requires creation of a test bench and experimental testing of developed inertial navigation solutions. It is possible to reduce time and financial costs in the design and development of systems using inertial navigation if most of the experiments and tests are based on a mathematical model. Therefore, the methods of building virtual sensors for modeling the spatial motion of robotic systems become interesting, as well as the practical application of such sensors in the study of robotic systems.

The article is devoted to solving the problems of creating a virtual sensor for inertial navigation containing three-axis accelerometers and gyroscopes in the CoppeliaSim modeling environment. The work of such sensor was checked in linear and rotational displacement test cases, and the errors in determining acceleration and angular velocity by such sensor were evaluated.

Keywords: mobile robot, manipulator, gyroscope, accelerometer, signal processing, mathematical model

REFERENCES

1. Aleshkin V.V., Zrazhevsky R.A., Golovanov P.N., Marusich V.O. Methods and Algorithms for Correcting Kinematic Equations in the Problem of Determining the Orientation of an Object [Metody i algoritmy korrektsii kinematicheskikh uravnenij v zadache opredeleniya orientatsii ob"ekta]. Mechatronics, Automation, Control. 2021. Vol. 22, No. 9. Pp. 494–504. DOI: 10.17587/mau.22.494-504. (rus)
2. Robert B., Krzysztof J. Determining of an object orientation in 3D space using direction cosine matrix and non-stationary Kalman filter. Archives of Control Sciences. 2016. Vol. 26, No. 2. Pp. 223–244. DOI: 10.1515/acsc-2016-0013
3. Alexey G. Application of MEMS-technology in navigation [Primenenie MEMS-tekhnologii v navigatsii]. Components and technologies. 2014. Vol. 153, No. 4. Pp. 65–69. (rus)
4. Butakov N.A. Applicability of inertial navigation systems in mobile devices [Primenimost' inercial'nykh sistem navigatsii v mobil'nykh ustroystvakh]. International Journal of Open Information Technologies. 2014. Vol. 2, No. 5. (rus)
5. Zhmud V.A., Kuznetsov K.A., Kondratyev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V. Accelerometer and Gyroscope MPU6050; the First Inclusion on STM32 and the Study of its Indications in Statics [Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkluyuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike]. Automation and software engineering. 2018. Vol. 25, No 3. Pp. 9–22. (rus)
6. Liang X., Xiaochi H., Yuanyuan Y., Ao S., Xuan Y., Jiaxin D., Shuai D. Research on IMU-Based Motion Attitude Acquisition and Motion Recognition. IEEE Sensors Journal. 2024. Vol. 24, Iss. 13. Pp. 20786–20793. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3394903
7. Lukyanov E.A., Mpengele E.B. Estimation of inertial navigation errors from the object motion parameters [Ocenka oshibok inercial'noj navigatsii ot parametrov dvizheniya ob"ekta]. Actual problems of science and technology. 2023. Pp. 820–821. (rus)
8. Mammadov A.Z. Model inertial navigation for unmanned aerial vehicles [Model' inercial'noj navigatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov]. Universum: Technical Sciences. 2021. Vol. 86, No. 5. Pp. 5–9. DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11683. (rus)
9. Wagner J.F. About Motion Measurement in Sports Based on Gyroscopes and Accelerometers an Engineering Point of View [ob izmerenii parametrov dvizheniya sportsmenov s pomoshch'yu giroskopov i akselerometrov. Tekhnicheskie aspekty]. Gyroscopy and Navigation. 2017. Vol. 25, No 3. Pp. 3–31. DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.3.003-031. (rus)
10. Kristel C., Leonardo B. A Comparative Analysis of Sensor Fusion Algorithms for Miniature IMU Measurements. International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. 2023. Pp. 239–244. DOI: 10.1109/ISITIA59021.2023.10220994
11. Abdullah E.O., Mustafa E.A. A Practical Implementation of a Low-Cost 6-DOF IMU by Kalman Algorithm. European Journal of Science and

Technology. 2021. Iss. 32. Pp. 167–170. DOI: 10.31590/ejosat.1040765

12. Sebastian O.H., Samuel W., Ruth T., Jane B., Christos K., Ravi V. An Extended Complementary Filter for Full-Body MARG Orientation Estimation. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2020. Vol. 25, Iss. 4. Pp. 2054–2064. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2992296

13. Rabab B., Laszlo D., Gyorgy K. Simulation and trajectory optimization of collaborating robots by application of solidworks and matlab software in industry 4.0. Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2020. Vol. 18, iss. 4.

14. Mikhail I., Stanislav M., Sergei S. Robot description formats and approaches: Review. International Conference «Nonlinearity, Information and Robotics» (NIR). 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/NIR52917.2021.9666120

15. Andrew F., Jie W., Joshua A.M. how to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion. ScienceDirect (Elsevier). 2022. Vol. 120. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102629

16. Zander B., Manuel L. Scripting Farming Simulator with Lua: Unlocking the Virtual Fields. Springer Nature. 2023. Pp. 45–83. DOI: 10.1007/979-8-8688-0060-3

17. Yan Z., Bin F., Guofeng Z., Xueming B. The Application of CoppeliaSim EDU in Robot Course Teaching. Journal of Education and

Educational Research. 2024. Vol. 7, No. 1. DOI: 10.54097/as82qn67

18. Daniella T., Peter C. Understanding URDF: A Dataset and Analysis. IEEE Robotics and Automation Letters. 2024. Vol. 9, Iss. 5. Pp. 4479–4486. DOI: 10.1109/LRA.2024.3381482

19. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. The Use of Accelerometer ADXL335 for the Determination of Angle of Departure from Vertical Line [Ispol'zovanie akselerometra ADXL335 dlya opredeleniya ugla otkloneniya ot vertikali]. Automation and Software Engineering. 2014. No. 2. Pp. 68–72. (rus)

20. Matveev V.V., Kislovsky E.Yu, Milchenko D.N., Raspopov V.Ya., Telukhin S.V., Pogorelov M.G., Likhoshester V.V. Tracking System of Moving Objects on MEMS-Gyroscopes [Sistema soprovozhdeniya podvizhnykh ob"ektov na MEMS-giroskopah]. Mechatronics, automation, control. 2019. Vol. 20, No. 7. Pp. 437–442. DOI: 10.17587/mau.20.437-442. (rus)

21. Eric R., Surya P., Marc F. CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520

22. Solonina A.I., Kliensky D.M., Merkuicheva T.V., Perov S.N. Digital Signal Processing and MATLAB [ifrovaya obrabotka signalov i MATLAB]. SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 512 p.

Information about the authors

Lukyanov, Evgeny A. PhD, Associate Professor of Robotics and Mechatronics Department. E-mail: lukevgan@gmail.com. SPIN RINZ:1047-6600. ORCID: 0000-0002-6363-6511. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

Mpengele, Eric B. PhD student, Department of Robotics and Mechatronics. E-mail: mpebiser@gmail.com. ORCID: 0009-0005-7500-5978. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don region, Gagarin Square, 1.

Alkhalili Alak, Sabah B. PhD student, Department of Robotics and Mechatronics. E-mail: alaqsabab@yahoo.com. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don region, Gagarin Square, 1.

Received 25.10.2024

Для цитирования:

Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б. Создание виртуального датчика для моделирования систем инерциальной навигации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 125–135. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135

For citation:

Lukyanov E.A., Mpengele E.B., Alkhalili Alak S.B. Creation of a virtual sensor for modeling inertial navigation systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 125–135. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-136-145

^{1,*}Таранюк И.В., ¹Слободюк А.П., ²Фоменко Ю.В.¹Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

*E-mail: taranyukiv@ya.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ УСТАНОВОК ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. Лазерная резка металла становится все более популярной в различных отраслях промышленности благодаря современным компактным лазерным резакам, которые используются даже на небольших предприятиях. Проблемы, связанные с цехами лазерной резки металла на металлургических и металлообрабатывающих предприятиях, включают в себя угрозу здоровью рабочих за счет вредных выбросов на таких производствах.

В процессе лазерной резки металлических листов происходит термическое воздействие на материал, в результате которого в воздух выделяются вредные вещества, входящие в состав сталей, такие как оксиды азота, марганец, оксид цинка и другие. Эти вещества могут вызывать различные заболевания дыхательных путей, кожи и глаз.

Для снижения уровня загрязнения воздуха на заводах применяются такие технические решения, как установка вытяжных шкафов и систем фильтрации. Однако эффективность этих систем не всегда обеспечивает достаточный уровень поглощения вредных веществ, что требует постоянного контроля и совершенствования.

В проведенной работе для оценки эффективности систем фильтрации и вытяжки предложены расчетные методы определения концентрации вредных веществ и проведен анализ газовых выбросов. Эти методы позволяют определить фактические значения содержания вредных веществ в воздухе, что в свою очередь позволяет сопоставить их с санитарно-эпидемиологическими нормами.

Ключевые слова: предельно допустимая концентрация (ПДК), воздух рабочей зоны, газовый анализ, аспиратор, лазерная резка.

Введение. Металлургические и металлообрабатывающие заводы представляют собой важный сектор промышленности в России, который обеспечивает производство широкого спектра металлических изделий и конструкций. Однако функционирование таких предприятий может оказывать значительное воздействие на окружающую среду и здоровье населения. В связи с этим вопрос об экологической безопасности металлургических и металлообрабатывающих заводов становится всё более актуальным [1].

Во-первых, стоит отметить, что металлургические и металлообрабатывающие заводы имеются в каждой области Российской Федерации. Это обусловлено необходимостью обеспечения потребностей различных отраслей экономики, таких как автомобилестроение, электрификация, строительство и др. в металлических материалах и конструкциях. Однако такое широкое распространение заводов данного типа приводит к тому, что они могут оказывать существенную нагрузку на экологию городов, в которых они расположены. Производство и обработка металлов приводит к выбросам в атмосферу различных вредных веществ, таких как оксиды серы, азота, углерода, тяжёлых металлов. Они могут вызывать заболевания у людей, животных, ухудшение общей экологии воздуха, что в свою очередь негативно сказывается на состоянии окружающей среды [2,

3]. К списку негативного влияния данного процесса можно отнести следующие загрязнения:

- Загрязнения водных ресурсов, таких как сточные воды, в составе которых ввиду производства могут оказаться различные вредные вещества [4]. Сами по себе сточные воды при попадании в иные водные объекты соответственно вызовут их загрязнение. Это может привести к гибели водных организмов, нарушению экологического баланса и ухудшению качества воды [5].

- Воздушные загрязнения: в процессе производства и обработки металлов образуются различного рода легковесные отходы, такие как шлаки, пыль, газы и другие [6]. Эти отходы ввиду своей летучести с легкостью смешиваются с воздушной средой, однако их нейтрализация является сложным процессом, ввиду чего негативное воздействие на воздушную среду оказывается малозаметно и трудноустранимо. Данный вид загрязнения имеет максимально возможный риск перерасти в другой тип и следом заражать как воздушную, так и водную и визуальную среду.

- Шумовое загрязнение. Промышленное производство, особенно металлургическое, сопровождается шумом, который классифицируется как один из вредоносных факторов и так же имеет свои нормируемые значения. Фактор шума может оказывать длительно и накопительное воздействие на организм человека, что впоследствии

может привести к нарушениям сна, снижению работоспособности, нервным срывам и другим немаловажным проблемам.

- Зрительное загрязнение кажется маловажным на первый взгляд фактором, однако если взять во внимание тот факт, что в крупных промышленных городах уровень смога напрямую на график проветривания помещений и выхода населения из дома, можно сказать какой уровень сажи и иных осадков остается на зданиях, заборах и иных сооружениях. Данный факт не только портит картину города, но и привлекает внимание окружающих на проблемы экологического характера. Помимо этого, нельзя не заметить снижение эстетической красоты города в целом, что ведет к снижению уровня счастья населения.

Как можно заметить, все вышеперечисленные виды загрязнений имеют в большинстве своем негативное влияние в отношении здоровья людей, причем оно может выражаться сразу в ряде заболеваний:

- Заболевания дыхательной системы: вредные выбросы могут вызывать заболевания дыхательной системы, такие как бронхит, пневмония, астма. Так же немал риск и онкологических заболеваний легких, гортани и других органов, обеспечивающих дыхание.

- Поражение сердечно-сосудистой системы. Нередки случаи возникновения сердечных приступов ввиду чрезмерной работы в зоне с повышенной концентрацией вредных веществ. Аналогичная ситуация обстоит с людьми, попавшими под действие выброса этих веществ в обычной городской среде по причине отсутствия защитных средств. Из менее негативных последствий – повышение артериального давления, головные боли ввиду микроразрывов сосудов.

- Истощение нервной системы: шум и другие факторы могут вызывать нарушения сна, снижение работоспособности, раздражительность.

- Ухудшение репродуктивной способности: некоторые вещества могут вызывать снижение способности людей к воспроизводству, вызывая нарушения фертильности, проблемы с зачатием и т.п.

Для борьбы с загрязнениями воздуха рабочей зоны и (или) атмосферы, на предприятиях применяют разного рода технические и конструктивные решения, такие как: вытяжки, системы фильтрации и подачи воздуха и др. [3].

Одно из таких решений - вытяжные шкафы. Это системы, которые удаляют загрязненный воздух из рабочей зоны и заменяют его чистым. Вытяжные установки могут быть установлены над производственным оборудованием или в других местах, где происходит загрязнение воздуха. Они могут быть как стационарными, так и

передвижными.

Системы фильтров - еще одно эффективное решение для борьбы с загрязнением воздуха. Они используются для очистки воздуха от примесей и вредных частиц. Существует несколько типов систем фильтрации, включая механические, электростатические и адсорбционные. Выбор конкретной системы зависит от типа загрязнения и требований к качеству воздуха.

Различные системы подачи воздуха обеспечивают постоянный приток свежего воздуха в рабочую зону. Они могут быть естественными (за счет вентиляции) или принудительными (с помощью вентиляторов). Системы подачи воздуха помогают поддерживать оптимальный уровень кислорода и удалять из воздуха вредные примеси.

Помимо вытяжек, систем фильтрации и подачи воздуха, предприятия могут использовать и другие технические и конструктивные решения для борьбы с загрязнением воздуха. Например, использование герметичного оборудования, изоляция опасных процессов, установка датчиков загрязнения воздуха и многое другое.

Основанием для применения тех или иных решений по защите от вредных выбросов является превышение норм концентрации опасных и вредных веществ, выделяемых при выполнении технологических процессов, в воздухе рабочей зоны.

Лазерная резка металлов в последнее время становится неотъемлемой частью заготовительных участков, механических цехов и производств по всему миру, а новые, более компактные лазерные резаки также можно встретить даже на небольших металлообрабатывающих предприятиях.

Обеспечение безопасных условий работы для персонала цеха лазерной резки оцинкованного листового металла, а также ограничение вредных выбросов в атмосферу является актуальной задачей. При этом первым этапом её решения является определение текущей концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны цеха.

Цели работы:

1. Установить предполагаемое количество и состав вредных выбросов в воздух рабочей зоны установок лазерной резки металлов на металлообрабатывающих предприятиях, используя эмпирические методы (осмотр, наблюдение, опрос).

2. Исследовать воздух рабочей зоны на предмет наличия и концентрации предполагаемых вредных выбросов методом газового анализа (теоретические методы исследования).

3. Оценить соответствие расчетных результатов практическим результатам.

4. Оценить эффективность действующих

вентиляционных систем и соответствие реальных значений концентраций вредных выбросов санитарно-эпидемиологическим нормам для дальнейшего снижения уровня загрязнения воздуха на производстве.

Материалы и методы. Решение поставленной задачи осуществлялось в следующем порядке:

- проводился первичный осмотр производственного помещения и опрос производственного персонала (эмпирический метод исследования);
- выполнялось аналитическое определение концентрации вредных веществ, выделяемых при лазерной резке, с учетом работы вентиляционной системы цеха (теоретические методы исследования);
- осуществлялся непосредственный замер концентрации вредных веществ в цехе (фотометрический метод исследования, газовый анализ).

Осмотр производственного помещения

В соответствии с СП 2.2.1.1312-03 «Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий» механическая вентиляция предусматривается для помещений и отдельных участков, в которых нормируемые микроклиматические параметры и содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не могут быть обеспечены естественной вентиляцией, а также для помещений и зон без естественного провет-

ривания. Так же оборудование, характеризующееся выделением вредных веществ, пыли, тепла, влаги, должно быть оснащено устройствами местной вытяжной вентиляции (отсосами открытого или закрытого типа), встроенными в технологическое оборудование либо максимально приближенными к нему.

В цехе лазерной резки установлены следующие типы вытяжных систем:

- приточно-вытяжная вентиляция общего назначения (рис. 1);
- местная вентиляция лазерного станка с использованием заводских вентиляционных систем (рис. 2 а, б, в).
- местная дополнительная вентиляция станка лазерной резки в купольном исполнении (рис. 3).



Рис. 1. Приточно-вытяжная вентиляция всего помещения цеха

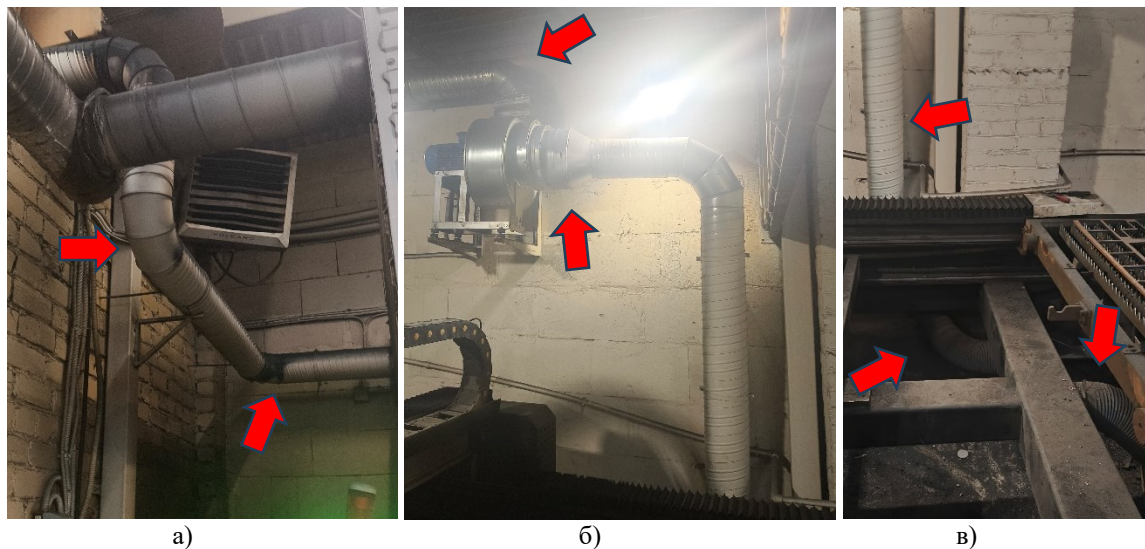


Рис. 2. Местная вентиляция станка лазерной резки (а) магистральные вентиляционные трубы; (б) вытяжной агрегат; (в) заходы вентиляционных труб в технологические вентиляционные выводы станка

Несмотря на их наличие первичный осмотр помещения цеха лазерной резки металла выявил наличие следов осаждения в виде налета белого и желтоватого оттенков [6]. Такой налет был обнаружен на стенах, особенно в зонах примыкания стен к потолку, и верхних частях рам окон,

на вентиляционном куполе как внутри него, так и снаружи. Наибольшее загрязнение регистрируется в местах, удаленных от вентиляционных воздухозаборов [7] и как следствие вокруг них возникают пятна.



Рис. 3. Дополнительная местная вентиляция станка лазерной резки (а) вытяжной агрегат и система вентиляционных труб; (б) самодельное сопло, располагаемое в вентиляционной трубе и самодельный купол параллелепипедальной формы

Также, следы похожего налета обнаружены некоторых частях производственного оборудования и на элементах вентиляционных систем (рис. 4). В результате опроса операторов станков лазерной резки было установлено, что в конце смен с полной загрузкой оборудования, особенно когда осуществляется резка оцинкованной стали, отмечаются жалобы на головные боли и даже случаи тошноты.

Так следы осаджений на стенах, потолке,

окнах, оборудовании, а также жалобы на тошноту и головные боли у работников цеха могут свидетельствовать о наличии в воздухе рабочей зоны производственных установок вредных веществ в концентрациях, близких или превышающих ПДК. Наличие данных осаджений в границах рабочей зоны свидетельствует о распространении осадков по цеху [8]. Следовательно, необходимы дальнейшие исследования для поиска решения проблемы.

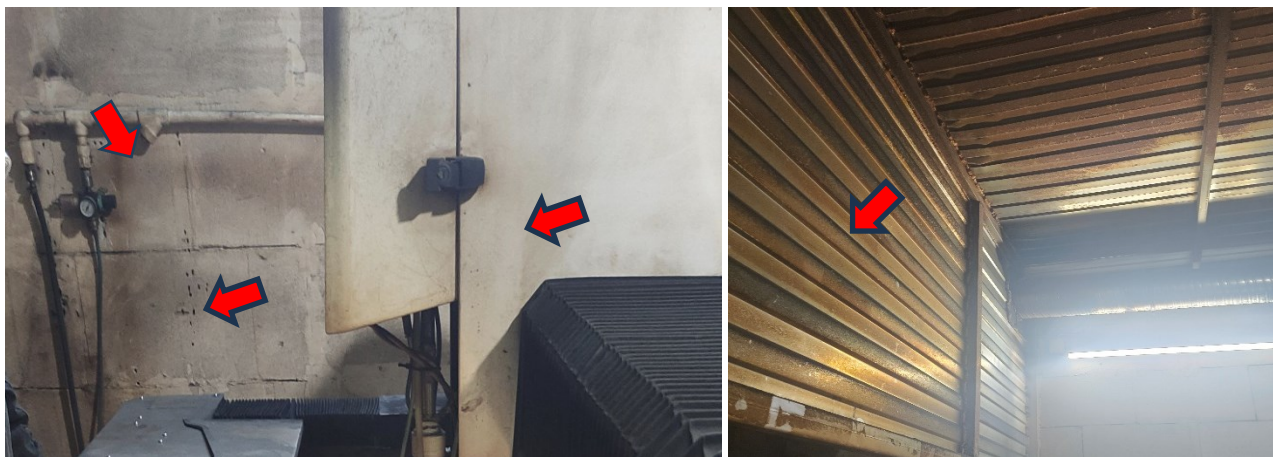


Рис. 4. Отложения на строительных конструкциях и оборудовании

Основная часть. Чаще всего в цеху осуществляют лазерную резку оцинкованной стали Ст3. Во время лазерной резки оцинкованных изделий происходит выделение веществ, входящих в состав сварочных аэрозолей [9], таких как оксид цинка, оксид железа, марганец, оксид углерода, медь. Расчет концентрации веществ, выделяемых в воздух рабочей зоны, с учетом работы имеющихся вентиляционных установок произведем по цинку (2 класс опасности) и марганцу (1 класс опасности), как по наиболее опасным по

степени воздействия на организм по классификации ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартов безопасности труда вредные вещества классификация и общие требования безопасности похоже».

Произведем расчет концентрации для цинка (Zn) в воздухе рабочей зоны как для одного из компонентов оцинкованной стали.

Объем цинка, выделяемого при лазерной резке оцинкованного металла, рассчитывается по формуле:

$$V_{Zn} = L_{\text{реза}} \cdot S_{\text{реза}} \cdot 2 \cdot h_{\text{слоя}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{реза}}$ – длина реза (средняя за час работы), м; $S_{\text{реза}}$ – ширина реза, м; $h_{\text{слоя}}$ – высота слоя цинка, м.

$$V_{Zn} = 100 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тогда масса выделяемого цинка будет равна произведению плотности цинка на полученный объем:

$$m_{Zn} = 7140 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Концентрация выделяемого при лазерной резке цинка будет равна отношению массы к объему рабочей зоны [3]:

$$\mu_{Zn} = \frac{m_{Zn}}{V_{\text{раб.зоны}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{раб.зоны}}$ – объем рабочей зоны, вычисляемый как произведение $V_{\text{ШХГ}}$, м³;

$$\mu_{Zn} = \frac{5,7 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 7 \cdot 3} = 0,03878 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 38,78 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Вентиляция, установленная в цеху, обеспечивает производительность $6488 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$, что при объеме помещения цеха 1680 м^3 дает кратность воздухообмена, равную 3,86.

Таким образом, с учетом работы вентиляции будет обеспечиваться концентрация паров цинка, равная:

$$\mu_{Zn2} = \frac{5,7 \cdot 10^{-3}}{\frac{6488}{1680} \cdot (7 \cdot 7 \cdot 3)} = 10,04 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Аналогично производим расчет концентрации марганца (Mn). Объем марганца, выделяемого при резке, рассчитаем по формуле:

$$V_{Mn} = L_{\text{реза}} \cdot S_{\text{реза}} \cdot h_{\text{листа}} \cdot \%_{\text{вещ.}}, \quad (3)$$

где $L_{\text{реза}}$ – длина реза (средняя за час работы), м; $S_{\text{реза}}$ – ширина реза, м; $h_{\text{листа}}$ – ширина металлического листа, м; $\%_{\text{вещ.}}$ – процентное содержание исследуемого вещества в металле (доля марганца в Ст3 составляет до 0,5 % [10]).

Принимая $L_{\text{реза}} = 100 \text{ м}$, $S_{\text{реза}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_{\text{листа}} = 1 \text{ м}$, получаем

$$V_{Mn} = 100 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 0,05 = 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Тогда масса выделяемого марганца будет равна произведению плотности на полученный объем:

$$m_{Mn} = 7470 \cdot 10^{-4} = 0,747 \text{ кг}.$$

Концентрация выделяемого при лазерной резке марганца с учетом вентиляции будет равна:

$$\mu_{Mn2} = \frac{0,747}{\frac{6488}{1680} \cdot (7 \cdot 7 \cdot 3)} = 1300 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}.$$

Сравнивая полученные результаты с нормами ПДК для производственных помещений [9], получаем превышение предельно допустимых концентраций по цинку и марганцу (таблица 1).

Таким образом, получает подтверждение выдвинутая нами гипотеза о том, что существующая система вентиляции не справляется со своевременным удалением вредных веществ из рабочей зоны оборудования лазерной резки, а высокие концентрации таких веществ на рабочем месте оператора могут быть причиной недомоганий и предпосылками для развития профзаболеваний.

Таблица 1

Сравнение полученных значений с предельно допустимыми

Вещество	ПДК ¹ вещества (м.р. ² /с.с. ³), ($\frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$)	Расчетная концентрация вещества, ($\frac{\text{мг}}{\text{м}^3}$)
Цинк (Zn)	1,5 / 0,5	10,04
Марганец (Mn)	0,6 / 0,2	1300

В таблице 1 использованы обозначения:

¹ Предельно допустимая концентрация [9].

² Максимальная разовая ПДК.

³ Среднесменная ПДК.

Расчетные значения по очевидным причинам могут отличаться от реальных ввиду факторов, не учтенных в расчетах. Такими факторами, к примеру, являются форма помещения, влияющая на воздушные потоки и завихрения, место установки вентиляционного оборудования, отсутствие в расчетах влияния собственной вентиляции станка лазерной резки и др.

Поэтому для экспериментальной проверки полученных результатов нами принято решение

выполнить непосредственные измерения концентрации вредных веществ [11] в цехе лазерной резки.

Экспериментальные исследования. Исследования производились по методике, установленной ФР.1.31.2021.39518 [12].

Измерения выполнялись с помощью специализированного комплекта оборудования, включающего: газоанализирующий прибор (аспиратор) Пу-3Э, спектрометр «СФ-2000», аспиратор «ПУ-4Э», спектрометр атомно-абсорбционный

«КВАНТ.З», измеритель параметров микроклимата «Метеоскоп-М», газоанализатор многокомпонентный «Полар 2» [13], термогигрометр «ИВА-6Н-Д».

Осуществлялся забор проб [14] воздуха рабочей зоны оператора станка лазерной резки.

При этом газозаборные трубки аспиратора (пробоотборники) располагались на груди оператора станка для анализа непосредственно вдыхаемых выделяющихся при резке веществ (рис. 5).



Рис 5. Расположение газозаборных трубок

Дополнительная информация, необходимая для получения результатов:

- Дополнения, отклонения или исключения из методик выполнения измерений: отсутствуют.

- Исследования и измерения проводились в закрытом производственном помещении при температуре 16 °С и атмосферном давлении (для установления процедуры стадии отбора аналитической пробы по методике анализа промышленных выбросов).

- Сведения о продолжительности воздействия фактора и номинальной продолжительности рабочего дня не представляют собой усред-

ненную картину, а являются результатом измерения в течение 8 часов.

Анализ полученных результатов начинаем с визуальной оценки входного фильтра аспирационной трубки (рис. 6). Как видно на фото, после выполнения замера на фильтре явно видны следы отложений рыжего окраса, что свидетельствует о наличии в воздухе рабочей зоны оператора существенного количества твердых частиц, которые в большинстве своем самостоятельно не разлагаются и могут накапливаться на строительных конструкциях и элементах оборудования [15].

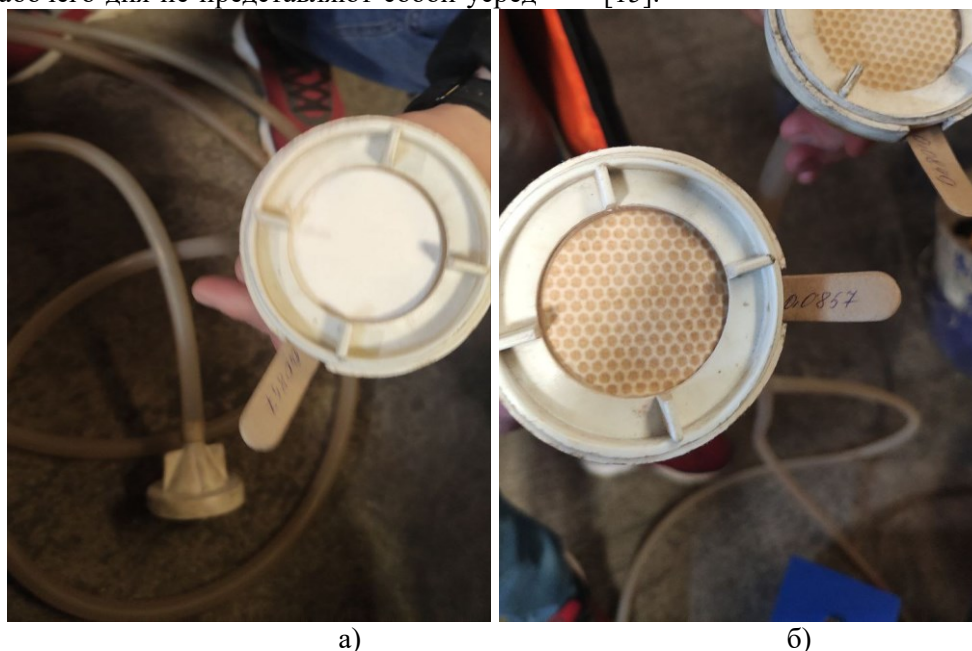


Рис. 6 Входные фильтры аспирационных трубок (а) исходное состояние; б) после замера

Результаты дальнейших исследований, отобранных образцов на измерительном комплексе, дают информацию о содержании в воздухе рабочей зоны всех вредных веществ, зафиксированных прибором (таблица 2).

Анализ полученных данных и их сравнение с нормативами СанПиН 1.2.3685-21 («Гигиенические нормативы и требования к обеспече-

нию безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания») показали превышение ПДК по марганцу (таблица 2): средней сменной на 20% и максимальной разовой концентрации - на 75%. Кроме того, по таким веществам, как оксид углерода, оксид железа и цинк наблюдаются заметные выбросы, в некоторых случаях приближающиеся к границам нормы.

Таблица 2

Результаты исследований (испытаний) и измерений

№ п/п	Определяемый показатель, ед. измерения	Максимальная разовая массовая концентрация вредных веществ	Среднесменная массовая концентрация вредных веществ	Величина ПДК ¹ , (мг/м³)	Класс опасности
1	Железо в пересчете на оксид железа (III), (мг/м³)	1,16	0,812	-/6	4
2	Марганец, (мг/м³)	0,086	0,060	0,05	1
3	Углерода оксид, (мг/м³)	5	5	20	4
4	Хром, (мг/м³)	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,539 \cdot 10^{-3}$	0,03/0,01	1
5	Цинк, (мг/м³)	$134 \cdot 10^{-3}$	$93,8 \cdot 10^{-3}$	1,5/0,5	2
6	Никель, (мг/м³)	$0,89 \cdot 10^{-3}$	-	0,05	1
7	Медь, (мг/м³)	$13 \cdot 10^{-3}$	-	1,0/0,5	2

В таблице 2 использованы обозначения:

¹В числителе – максимальная разовая ПДК, в знаменателе – среднесменная ПДК. Прочерк в числителе значит, что норматив установлен в виде средней сменной ПДК.

По хрому, никелю и меди выбросы имеются, но незначительные, не приближающиеся к границам ПДК. Однако, совокупное воздействие всех этих веществ может быть причиной наблюдающихся недомоганий персонала цеха.

Выводы. Проведенное исследование показало, во время работы оборудования лазерной резки металла в воздухе рабочей зоны в районе расположения оператора станка обнаруживаются вредные вещества в концентрациях, превышающих ПДК, что ранее не было достаточно исследовано для конкретных условий малых и средних предприятий.

Предположение, что этот факт имеет место, было сделано после визуального обследования помещения цеха и технологического оборудования, подтверждено расчетным путем и окончательно доказано путем прямых инструментальных измерений.

Новым результатом нашего исследования является установление, что содержание марганца (вещество первого класса опасности) в воздухе рабочей зоны превышает допустимые нормы как в максимальной разовой массовой концентрации (на 72%), так и по среднесменной массовой концентрации (на 20%).

Кроме того, в ходе исследования впервые в воздухе рабочей зоны были обнаружены хром, никель (вещества первого класса опасности –

чрезвычайно опасные), медь и цинк (вещества второго класса опасности – высоко опасные). И если концентрация хрома, никеля и меди мала (около 1,5...2% от ПДК), то по цинку среднесменная массовая концентрация приближается к 27 % от ПДК, что также не было должным образом учтено в существующих системах фильтрации. Опасность обнаруженных веществ усугубляется тем фактом, что самостоятельно данные вещества не разлагаются и могут накапливаться на строительных конструкциях и элементах оборудования, оказывая чрезвычайно вредное воздействие на окружающую среду и на здоровье человека.

Таким образом установлено, что задача отвода из рабочей зоны оператора и нейтрализации вредных выбросов, образующихся при лазерной резке оцинкованного черного металла актуальна и требует решения как в части модернизации существующих систем борьбы с вредными выбросами, которые работают не эффективно, так и в части новых технических мер.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов В.Г. Металлургия и металлообработка. Россия и другие страны СНГ (том 10). Изд-во.: Агентство деловой информации, г. Москва, 2007 г. 368 с.

2. Шицкова А.П., Новиков Ю.В., Климкина Н.В. Охрана окружающей среды от загрязнения предприятиями черной металлургии. Изд-во: Металлургия, 1982. 70 с.

3. Таранюк И.В., Слободюк А.П. Зона выбросов и концентрация вредных веществ, выделяемых при лазерной резке металлов // VI Международной студенческой научная конференция «Горинские чтения. Инновационные решения для АПК» Т. 1. Майский ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. С. 130–131.

4. Дрешер К., Бёдекер В. Оценка комбинированного воздействия веществ: взаимосвязь между суммированием концентраций и независимым действием // Биометрия. 1995. 718 с.

5. Уоллес Л.А., Пеллицари Э.Д., Хартвелл Т.Д. Групповое исследование: воздействие токсичных веществ на организм 400 жителей Нью-Джерси, Северной Каролины и Северной Дакоты // Экологические исследования. 1987. №. 2. С. 290–307

6. Бройер Д., Сагунски Г., Хебиш Р. Определение и оценка химического загрязнения воздуха в помещениях на рабочих местах (за исключением работ, связанных с опасными веществами) [Методы мониторинга воздуха, 2015] // Сборник по охране труда и технике безопасности: годовые пороговые значения и классификации для рабочих мест. 2002. №. 1. С. 322–354.

7. Светлакова А.Н. Обзор способов вентиляции сварочного цеха // Наука и общество в условиях глобализации. 2019. №. 1. С. 58–60.

8. Фадеев А.Г., Горяев Д.В., Зайцева Н.В., Шур П. З., Редько С. В., Фокин В.А. Вредные вещества в воздухе рабочей зоны горнодобывающего сектора металлургической промышленности как факторы риска для здоровья работников (аналитический обзор) // Анализ риска здоровью. 2024. №. 2. С. 153–161

9. Коржова Е.Н., Степанова Т.В., Лодосамба С., Смагунова, А.Н. Контроль состава сварочных аэрозолей (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. №. 7. С. 6–18.

10. Адищев П.Г., Тетюшин, К.П., Целищев, А.С., Попова Я.А. Обзор применения изделий из износостойкой стали // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. №. 4. С. 10–13.

11. Таранюк И.В., Слободюк А.П. Анализ газов, выделяемых при лазерной резке оцинкованных металлов // VI Международная студенческая научная конференция «Горинские чтения. Инновационные решения для АПК» Т. 1. Майский ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. С. 130–131.

12. ФР.1.31.2021.39518 - Методика измерений массовой концентрации кадмия, кобальта, железа, марганца, меди, мышьяка, никеля, свинца, хрома и цинка в атмосферном воздухе и общественных зданий и в воздухе рабочей зоны методом электротермической атомно-абсорбционной спектроскопии, 2021 г. 11 с.

13. ПЛЦК.413411.004-02 РЭ. Газоанализаторы многокомпонентные «Полар-2» Руководство по эксплуатации. 2021 г. 20 с.

14. Родригес П.Э., Шварцбург Л.Э., Артемьева М.С. Методическое проектирование и ввод в эксплуатацию экспериментального стенда для исследования распространения вредных веществ в воздухе рабочих зон при обработке металлов в промышленности // Procedia Engineering. 2017. Т. 206. С. 588–593

15. Сакабе Х. Некоторые размышления о предельных значениях воздействия опасных веществ, находящихся в воздухе // Int'l Lab. Rev. 1978. Т. 117. С. 109–119.

Информация об авторах

Слободюк Алексей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и конструирования машин. E-mail: slobodyuk_ar@bsaa.edu.ru. Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1

Таранюк Игорь Викторович, аспирант кафедры технической механики и конструирования машин. E-mail: taranyukiv@yandex.ru. Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина Россия, 308503, Белгородская область, Белгородский район, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1

Фоменко Юлия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры управления судостроительным производством. E-mail: fomenkojv@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Россия, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3

Поступила 30.11.2024 г.

© Таранюк И.В., Слободюк А.П., Фоменко Ю.В., 2025

^{1,*}Taranyuk I.V., ¹Slobodyuk A.P., ²Fomenko Yu.V.
¹Belgorod State Agrarian University named after. V.Y. Gorin
²Sankt-St. Petersburg State Marine Technical University
*E-mail: taranyukiv@ya.ru

RESEARCH CONCENTRATION OF HARMFUL SUBSTANCES IN THE WORKING AREA AIR OF LASER CUTTING UNITS METALS

Abstract. Laser cutting of metal is becoming increasingly popular in various industries thanks to modern compact laser cutters that are used even in small enterprises. Problems associated with laser metal cutting shops at metallurgical and metalworking enterprises include the threat to workers' health due to harmful emissions from such industries.

During the laser cutting of metal sheets, the material is thermally affected, resulting in the release of harmful substances into the air that are part of the steel, such as nitrogen oxides, manganese, zinc oxide and others. These substances can cause various diseases of the respiratory tract, skin and eyes.

To reduce the level of air pollution in factories, such technical solutions as the installation of fume hoods and filtration systems are used. However, the efficiency of these systems does not always provide a sufficient level of absorption of harmful substances, which requires constant monitoring and improvement. In the work carried out to assess the efficiency of filtration and exhaust systems, calculation methods for determining the concentration of harmful substances are proposed and an analysis of gas emissions is carried out.

These methods allow us to determine the actual values of harmful substances in the air, which in turn allows us to compare them with sanitary and epidemiological standards.

Keywords: maximum permissible concentration (MPC), working area air, gas analysis, aspirator, laser cutting.

REFERENCES

1. Antonov V.G. Metallurgy and Metalworking. Russia and other CIS countries (volume 10). [Metallurgiya i metalloobrabotka. Rossiya i drugie strany SNG (tom 10).] Izdvo: Business Information Agency, Moscow, 2007. 368 p. (rus).
2. Shitskova A.P., Novikov Yu.V.V., Klimkina N.V. Environmental protection from pollution by ferrous metallurgy enterprises [Ohrana okruzhayushchej sredy ot zagryazneniya predpriyatiyami chernoj metallurgii. Izd-vo: Metallurgiya]. Izd-v: Metallurgy. 1982. 70 p. (rus).
3. Taranyuk I.V., Slobodyuk A.P., Emission zone and concentration of harmful substances emitted during laser metal cutting [Zona vybrosov i koncentraciya vrednyh veshchestv, vydelyaemyh pri lazernoj rezke metallov] VI International Student Scientific Conference "Gorin Readings. Innovative solutions for agroindustrial complex" Vol. 1. Mayskiy: FGBOU VO Belgorod GAU, 2024. Pp. 130–131 (rus).
4. Drescher K., Boedeker W. Evaluation of combined effects of substances: the relationship between summation of concentrations and independent effects. Biometrics, 1995. 718 p.
5. Wallace L.A., Pellizzari E.D., Hartwell T.D. The team study: exposure of 400 residents of New Jersey, North Carolina, and North Dakota to toxic substances. Environmental Research. 1987. No. 2. Pp. 290–307.
6. Breuer D., Sagunski H., Hebisch R. Determination and evaluation of chemical contamination of indoor workplace atmospheres (excluding activities involving hazardous substances) [Air Monitoring Methods, 2015] The MAK-Collection for Occupational Health and Safety: Annual Thresholds and Classifications for the Workplace. 2002. Vol. 1. No. 1. Pp. 322–354. (rus)
7. Svetlakova A.N. Review of ventilation methods for welding shop [Overview of welding shop ventilation methods]. Science and society in the context of globalization. 2019. No. 1. Pp. 58–60 (rus).
8. Fadeev A.G.G., Goryaev D.V., Zaitseva N.V., Shur P.Z., Redko S.V., Fokin V.A. Harmful substances in the air of the working zone of the mining sector of the metallurgical industry as risk factors for the health of workers (analytical review) [Vredny'e veshhestva v vozduxe rabochej zony' gornodobyvayushhego sektora metallurgicheskoy promyshlennosti kak faktory' riska dlya zdorov'ya rabotnikov (analiticheskij obzor)]. Analiz riska zdorov'yu. 2024. No. 2. Pp. 153–161. (rus).
9. Korzhova E.N., Stepanova T.V., Lodousamba S., Smagunova, A.N. Control of welding aerosol composition (review) [Control of welding aerosol composition]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostics of materials. 2015. Vol. 81. No. 7. Pp. 6–18 (rus).
10. Adishchev P.G., Tetyushin K.P., Tselishchev A.S., Popova Y.A. Review of the application of wear-resistant steel products [Application overview of wear-resistant steel products]. OMD Process Modeling and Development. 2019. No. 4. Pp. 10–13 (rus).

11. Taranyuk I.V., Slobodyuk A.P. Analysis of gases emitted during laser cutting of galvanized metals [Analiz gazov vydelyaemyh pri lazernoj rezke ocinkovannyh metallov] VI International Student Scientific Conference “Gorin Readings. Innovative solutions for agroindustrial complex” Vol. 1. Mayskiy FGBOU VO Belgorod GAU, 2024. Pp. 130-131 (rus).

12. FR.1.31.2021.39518. Methods of measurement of mass concentration of cadmium, cobalt, iron, manganese, copper, arsenic, nickel, lead, chromium and zinc in atmospheric air and public buildings and in work zone air by electrothermal atomic absorption spectrometry [Measurement procedure of mass concentration of cadmium, cobalt, iron, manganese, copper, arsenic, nickel, lead, chromium and zinc in the atmospheric air and public buildings and in the air of the working zone by electrothermal

atomic absorption spectrometry method]. 2021. 11 p. (rus).

13. PLTSK.413411.004-02 RE. Polar-2 multi-component gas analyzers [Polar-2 multicomponent gas analyzers]. Operation Manual. 2021. 20 p. (rus).

14. Rodriguez P.E., Shvartsburg L.E., Artemieva M.S. Methodical design and commissioning of an experimental stand for the study of the spread of harmful substances in the air of working zones during metal processing in industry [Methodical design and commissioning of an experimental stand to study the spread of harmful substances in the air of working areas during metal processing in industry]. Procedia Engineering. 2017. T. 206. Pp. 588–593.

15. Sakabe H. Some reflections on exposure limits for airborne hazardous substances. Int'l Lab. Rev. 1978. Vol. 117. Pp. 109–119.

Received 30.11.2024

Для цитирования:

Таранюк И.В., Слободюк А.П., Фоменко Ю.В. Исследование концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны установок лазерной резки металлов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 136–145. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-136-145

For citation:

Taranyuk I.V., Slobodyuk A.P., Fomenko Yu.V. Research concentration of harmful substances in the working area air of laser cutting units metals. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 136–145. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-136-145