

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2024

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**

№ 11, 2024 год

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

Vol. 11. 2024

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. Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 44446. (+12) Online подписка: http://www.akc.ru/itm/2558104627/ Цена свободная.
Подписан в печать	11.11.2024
Выход в свет	

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,39. Уч.-изд. л. 17,63. Тираж 40 экз. Заказ № 149

© ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2024

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
Подписка и распространение	Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446. Online subscription: http://www.akc.ru/itm/2558104627/
Signed for printing:	11.11.2024

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).

Борисов Иван Николаевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Мешерин Виктор Сергеевич, PhD, проф., директор института строительных материалов и заведующий кафедрой строительных

материалов Дрезденского Технического Университета (Германия, г. Дрезден).

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

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

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

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

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

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

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

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).

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

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

Фишер Ханс-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).

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

Ivan N. Borisov, 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. Grabovy, Doctor of Economic Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National research University) (Russian Federation, Moscow).

Aleksey N. Davidyuk, 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

Грушко И.С.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕНОСТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ 8

Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А.

МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ
ДОБАВОК С КОМПОНЕНТАМИ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО 23

Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э.

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ РАМНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОВТОРНО СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ 33

Римшин В.И., Амелин П.А., Сулейманова Л.А.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 42

Ладик Е.И., Перькова М.В., Чернышева Н.В.

ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ВДОЛЬ
СТАРОЛАДОЖСКОГО КАНАЛА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ 56

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Головко Д.А.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАСКЛИНИВАЮЩИХ
АГЕНТОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ БУРОВЫХ ОТХОДОВ 71

Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ 81

Харламов В.А., Лопанов А.Н., Дементьев К.В., Сысоев П.И.

МОДИФИКАЦИЯ БЕТОНОВ ИЗ ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТА ДОБАВКАМИ
НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЭКСТРАКЦИИ ЛЕЦИТИНА 92

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Дуюн И.А., Кабелянц П.С., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ СТЮАРТА
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ 102

Поляков А.Н., Никитина И.П., Позевалкин В.В.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
СТАНКА 116

Бондаренко Ю.А., Бестужева О.В., Баранов Д.С., Романович А.А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ШАРОВЫХ
ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦ 132

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Grushko I.S.

THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL BASIS OF THE PROCESSES OF FORMING THE MICROSTRUCTURE OF FOAM GLASS USING SECONDARY MINERAL RAW MATERIALS 8

Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., Nasonova V.V., Sums koy D.A.

MECHANISM OF CHEMICAL INTERACTION OF ORGANIC ADDITIVE OF BIOLOGICAL ORIGIN WITH COMPONENTS COMPOSITE BINDER 23

Al-sabaeei A.Q., Absimetov V.E.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF REINFORCING FRAME UNITS OF BUILDING METAL STRUCTURES UNDER REPEATED STATIC LOADS 33

Rimshin V.I., Amelin P.A., Suleymanova L.A.

NEURAL NETWORK FORECASTING OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS 42

Ladik E.I., Perkova M.V., Chernysheva N.V.

FEATURES OF URBAN DEVELOPMENT OF TERRITORIES ALONG THE STAROLADOJSKIY CANAL OF THE LENINGRAD REGION 56

CHEMICAL TECHNOLOGY

Golovko D.A.

THE EFFECT OF ADDITIVES ON THE STRENGTH PROPERTIES OF WEDGING AGENTS SYNTHESIZED ON THE BASIS OF DRILLING WASTE 71

Shakurova N.V., Dorogonov E.A., Bessmertnyi V.S., Ivleva I.A.

QUANTITATIVE CRITERIA FOR ASSESSING FROST RESISTANCE BASED ON THE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF WALL CERAMICS 81

Kharlamov V.A., Lopanov A.N., Dementyev K.V., Sysoev P.I.

MODIFICATION OF CONCRETE FROM GROUTING CEMENT WITH ADDITIVES BASED ON LECITHIN EXTRACTION WASTE 92

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Duyun I.A., Kabalyants P.S., Duyun T.A., Rybak L.A.

REINFORCEMENT LEARNING-BASED INTELLIGENT CONTROL FOR STEWART PLATFORM 102

Polyakov A.N., Nikitina I.P., Pozevalkin V.V.

CREATION OF A DIGITAL MODEL OF THE MACHINE TOOL THERMAL DEFORMATION SYSTEM 116

Bondarenko Yu.A., Bestuzheva O.V., Baranov D.S., Romanovich A.A.

PREDICTION OF THE RESIDUAL LIFE OF BALL TUBE MILLS 132

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22

Грушко И.С.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
E-mail: grushkois@gmail.com

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕНОСТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Аннотация. Повышение прочности пеностекла до значений, достаточных для использования его не только как теплоизоляционного, но и конструкционного материала, позволит значимо расширить область его применения и снизить материалоемкость строительства. Решение возможно за счет формирования управляемой и прогнозируемой гетерогенной аморфно-кристаллической структуры. Влияние кристаллической фазы на структуру и прочность пеностекла противоречиво и требует значимого внимания. Одновременно необходимо учитывать уже полученные результаты исследований по снижению стоимости материала за счет использования отходов. Однако, состав отходов различных захоронений варьируется, поэтому необходима универсальная методология разработки материалов. Предложена единая методология, позволяющая решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава, особое внимание в которой уделено задаче синтеза исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла. Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС в г. Новочеркасске. Полученные образцы пеностекла и результаты исследования использованы для установления особенностей процессов формирования микроструктуры пеностекла методом регрессионного анализа.

Ключевые слова: пеностекло, кристаллическая фаза, физико-химическое моделирование, инициатор кристаллизации, модификатор

Введение. Пеностекло характеризуется низкими значениями коэффициента теплопроводности, а также высокими звукоизолирующими характеристиками. Стабильность геометрических форм изделия позволяет использовать пеностекло для изоляции различных объектов строительства, а также промышленного оборудования, исключая плановые ремонты. Можно рассматривать в качестве примера монтаж пеностекла в составе теплоизоляционных конструкций: стены с отделкой тяжелой облицовкой, традиционной штукатуркой, из металлического профилированного листа, с отделочным слоем из облицовочного кирпича, а также рулонная кровля по железобетонному основанию, по профилированному листу, эксплуатируемая кровля, металлическая кровля по профилированному листу [1, 2].

Поскольку пеностекло не воспламеняется и не горит, а также инертно в агрессивных средах, его использование при теплоизоляции трубопроводов, используемых для транспортировки нефти и газа, показало высокую эффективность [3].

Увеличение значений прочностных характеристик пеностекла дает возможность расширения возможностей его применения в том числе как теплоизоляционно-конструкционного.

Прочностные характеристики определяются структурой пеностекла. Твердая фаза пеностекла

традиционно представлена стеклом. Влияние процесса кристаллизации на формирование структуры пеностекла и его эксплуатационные характеристики изучено не в достаточной степени. Наличие кристаллов определенных параметров в процессе термообработки шихты не создает препятствий формированию структуры с равномерной закрытой пористостью. В то же время кристаллизация стекла рассматривается и как отрицательное явление, тормозящее плавное и равномерное вспенивание. Совокупность факторов кристаллизации в пеностекле представлена на рисунке 1.

Если рассматривать межпоровую перегородку пеностекла, содержащую аморфную и кристаллическую фазы, то с физической точки зрения граница раздела этих фаз может быть источником напряжения, который при оказании воздействия приведет к разрушению материала. Однако, если величина кристаллических фаз будет находиться в допустимых пределах, то кристаллические включения армируют межпоровую перегородку и значения прочностных свойств пеностекла возрастают.

Учет микроструктуры, несомненно, является важной задачей в проектировании пеностекла повышенной прочности, однако, одновременно необходимо соблюдать существующие тенден-

ции к снижению стоимости продукта. Многочисленными исследованиями доказано, что снижение стоимости пеностекла возможно за счет использования вторичного минерального сырья [4, 5]. Одновременно это решает важную проблему утилизации промышленных отходов. Важной

научной проблемой при этом является не сама по себе разработка нового материала, а обобщение и определение методологии разработки таковых. Разрешение данной проблемы позволит решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава.



Рис. 1. Факторы процесса кристаллизации

По результатам проведенного обзора по проблеме исследований [6, 7] сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что применение золошлаковых отходов в качестве основного компонента шихты (65–70 %) для производства пеностекла снижает себестоимость на 25–30 % благодаря снижению затрат на сырье и эффективной утилизации отходов. Это обусловлено низкой стоимостью золошлаковых отходов, что позволяет сократить финансовые издержки. Использование данных отходов соответствует требованиям устойчивого развития, уменьшает экологический след и снижает нагрузку на полигоны с отходами.

2. Выявлено, что оптимальное соотношение аморфной и кристаллической фаз в пеностекле, равное 60:40, является наиболее эффективным для достижения требуемых эксплуатационных характеристик материала. Данное соотношение обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства с коэффициентом теплопроводности 0,06–0,08 Вт/м·К, что позволяет эффективно поддерживать температурный режим. Увеличенное содержание аморфной фазы способствует формированию однородной структуры, что в свою очередь повышает механическую прочность, достигающую 1,8–2,2 МПа.

3. Установлено, что введение 2–3 % наноразмерных добавок, таких как SiO_2 или Al_2O_3 , в шихту приводит к увеличению механической прочности на 15–20 % при минимальном воздействии на теплоизоляционные свойства. Данная закономерность обоснована эффектом тонкослойного покрытия наноразмерных частиц, что способствует улучшению адгезионной связи

между кристаллическими включениями основного компонента. Наночастицы, обладая значительной энергией границы раздела и проявляя эффективные взаимодействия с матрицей, формируют дополнительные межфазные границы, что, в свою очередь, увеличивает прочностные характеристики и препятствует образованию дефектов. Сохранение теплоизоляционных свойств при введении наноразмерных добавок связано с отсутствием значительных изменений в микроструктуре, что позволяет сохранить низкие коэффициенты теплопроводности.

4. Установлено, что формирование кристаллической фазы в виде игольчатых кристаллов диоксида размером 5–10 мкм играет ключевую роль в повышении механической прочности пеностекла. Данные кристаллы обеспечивают высокую степень армирования межпоровых перегородок благодаря удлиненной форме и прочности. Их размеры оптимальны для эффективного заполнения пор, что усиливает сцепление между зернами и улучшает распределение нагрузки. Это приводит к увеличению прочности на 15–20 %, так как повышается жесткость материала и снижается вероятность трещинообразования под механическими воздействиями. Наличие игольчатых структур создает структурную связь, препятствуя смещению частиц и повышая устойчивость к внешним нагрузкам.

5. Выявлено, что оптимальный температурный режим вспенивания и кристаллизации, находящийся в диапазоне 850–900 °С с выдержкой 15–20 минут, обусловлен термодинамическими и кинетическими процессами, протекающими в шихте. При данной температуре происходит интенсивное термическое разложение компонентов

шихты, что способствует активации диффузии газов и образованию структурно изоморфной матрицы. В этом диапазоне температур достигается высокая степень метастабильного состояния системы и однородное распределение компонентов в объеме формы, позволяющее формироваться пористой структуре с размерами пор 0,5–2,0 мм. Данные размеры обеспечивают оптимальное соотношение между механической прочностью и малой плотностью материала.

6. Установлено, что пеностекло, полученное из техногенного сырья, характеризуется высокой морозостойкостью (F100) и низким водопоглощением (не более 2 % по массе). Высокая морозостойкость является следствием его ячеистой структуры, что обеспечивает равномерное распределение механических напряжений и минимизирует риск формирования трещин в условиях циклического замораживания и оттаивания. Низкое водопоглощение достигается благодаря замкнутой пористой структуре, формируемой в процессе вспенивания. Данная структура препятствует проникновению влаги, что предотвращает ее расширение при замерзании внутри материала.

На основании анализа современного состояния теории и практики в области структурообразования пеностекла выдвинута следующая научная гипотеза: управление прочностными свойствами пеностекла возможно путем создания гетерогенной структуры, включающей кристаллические фазы определенных параметров.

Целью работы является комплексное решение крупной научной проблемы по разработке методологии прогнозирования эксплуатационных свойств пеностекла на основе вторичных сырьевых материалов – продуктов сжигания угля.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Изучение физико-химических закономерностей получения пеностекла для корректировки и прогнозирования процессов, активизирующихся при формировании их структуры с учетом использования техногенных сырьевых материалов, таких как золошлаковые отходы.

2. Определение оптимального состава сырьевой смеси и режимов термообработки для установления наиболее эффективных условий получения пеностекла с требуемыми эксплуатационными свойствами.

3. Изучение влияния химического состава и дисперсности компонентов сырьевой смеси для определения зависимостей их влияния на пористую структуру и процессы кристаллизации в пеностекле.

4. Разработка математической модели процесса получения пеностекла для прогнозирования его свойств, в качестве входных параметров которой, в том числе, выступают химический состав сырьевых компонентов и данные температурно-временного режима синтеза.

5. Исследование механизма формирования кристаллической фазы в пеностекле и его влияние на физико-механические свойства готовой продукции.

6. Разработка технологии получения пеностекла при использовании техногенного сырья и одностадийного режима термообработки.

7. Разработка комплексной методологии исследования, включающей физико-химическое моделирование и методы исследования структуры, неразрушающий и разрушающий контроль, с целью комплексного исследования процессов структурообразования.

8. Изучение влияния технологических добавок на структуру и эксплуатационные свойства пеностекла в процессе температурной обработки.

9. Разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации технологических параметров производства, которые обеспечат снижение энергозатрат и себестоимости производства.

Материалы и методы. Методология представлена в виде схемы на рисунке 2. Часть из указанных выше задач эффективно решается хорошо зарекомендовавшими себя методами. Структурно-методологическая схема исследований представлена на рисунке 3.

Основопологающей является задача получения исходных данных о вторичном минеральном сырье, так как ее результаты используются для установления оптимальных условий использования для синтеза пеностекла с использованием современных методов анализа. Для реализации данной задачи необходима полная информация о свойствах золошлаковых отходов ТЭС. Методология комплексного исследования золошлаковой смеси ТЭС должна включать в себя следующее. Для определения активности естественных радионуклидов золошлаковой смеси требуется санитарно-эпидемиологическая экспертиза в соответствии с Единными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Определение основных элементов золошлаковой смеси проводится методом рентгено-флуоресцентного анализа, фазово-минералогический анализ выполнен методом рентгеновской дифракции [8, 9]. Термические свойства золошлаковой смеси исследуются методом синхронного термического анализа

(СТА) в инертной атмосфере (Ar) с одновременной регистрацией кривых термогравиметрии

(ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) [10].

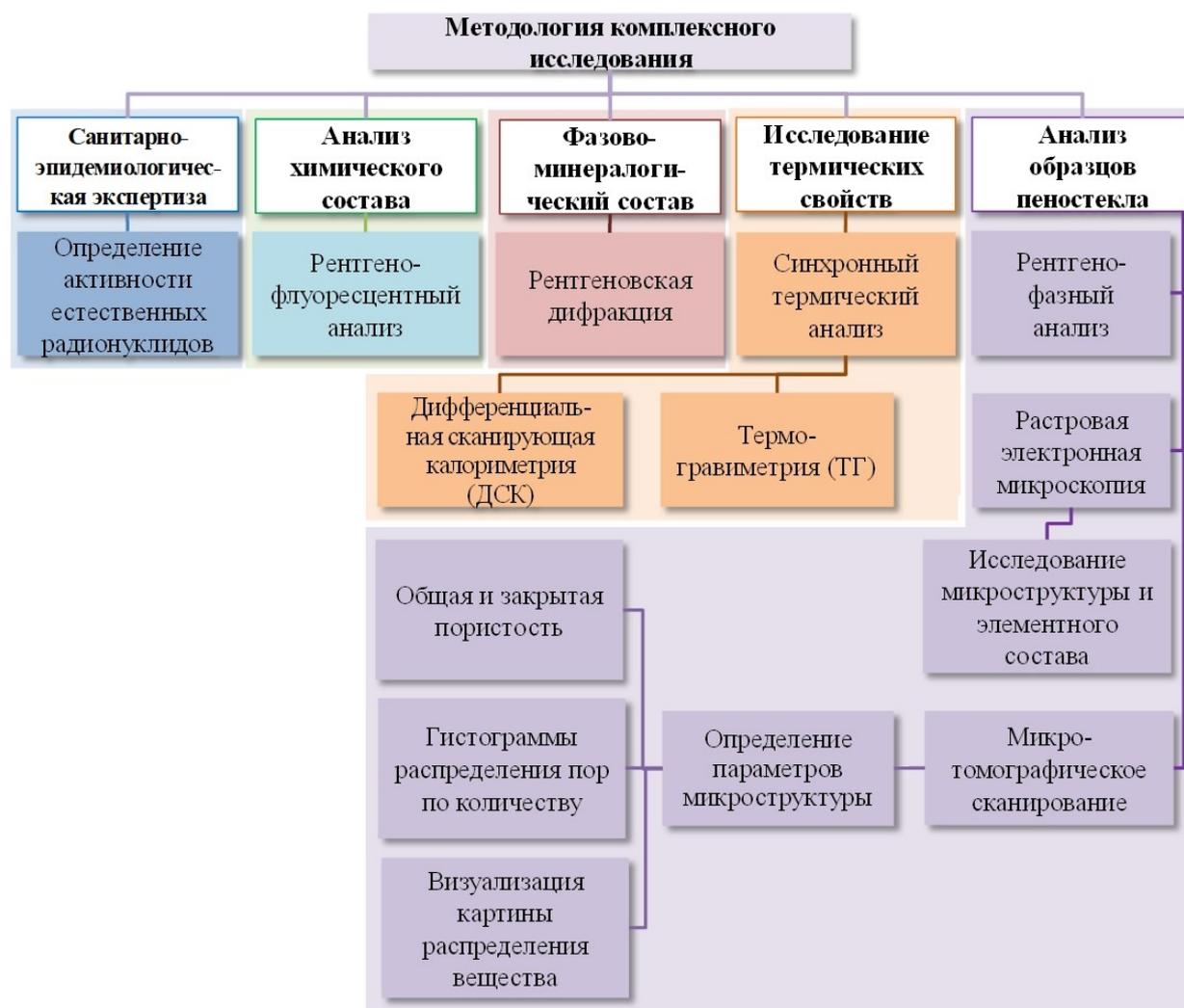


Рис. 2. Методология комплексного исследования

Для определения качественного и количественного фазового состава образцов пеностекла следует использовать метод рентгенофазового анализа. Исследование микроструктуры и элементного состава образцов рекомендуется выполнять с помощью растровой электронной микроскопии. Параметры микроструктуры пеностекла, такие как общая и закрытая пористость, гистограммы распределения объема пор по количеству, визуализация картины распределения вещества, наиболее плотных включений и пор в объеме, должны быть получены по результатам микротомографического сканирования [11, 12]. Термические свойства пеностекла рекомендуется исследовать методом синхронного термического анализа (СТА) с одновременной регистрацией кривых термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

Испытания свойств, получаемых образцов пеностекла (теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при

изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки) должны включать проверку соответствия требованиям ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме», ГОСТ EN 1602-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности», ГОСТ 33949-2016 «Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений (Приложение А)», ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ EN 1607-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям», ГОСТ EN 12430-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при действии сосредоточенной нагрузки».



Рис. 3. Структурно-методологическая схема исследований

Исследования закономерности влияния микроструктуры пеностекла на его свойства (теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки) могут быть выполнены различными статистическими методами или методами теории машинного обучения. Выбор конкретного метода следует основывать, в первую очередь, на количестве изготовленных образцов. Более сложные методы требуют большего объема исходных данных, большего числа уровней варьирования параметров; в ином случае высока вероятность т.н. «переобучения», при котором модели будут демонстрировать высокую точность в ходе разработки и низкую – в реальных условиях. На практике изготовление большого числа образцов позволит разработать модель неоправданно повышенной нелинейности и зачастую наиболее целесообразным является использование методов моделирования с применением регрессионного и корреляционного анализов.

Важной является разработка состава исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла. Данную задачу следует решать итерационно – методом последовательного приближения в следующем виде:

1. Поиск и анализ литературных источников, в которых для производства пеностекла используются аналогичные в части основного исходного состава шихты. Результатом данного этапа должен стать выбор температурно-временного режима «нулевого приближения».

2. Анализ литературных источников и определение модификаторов в качестве дополнительных элементов исходного состава шихты «нулевого приближения».

3. Выполнение моделирования процессов термообработки.

4. Анализ результатов; корректировка температурно-временного режима и переход на этапы 1, 2 или 3 в случае необходимости.

Выбор метода моделирования процессов термообработки является нетривиальной задачей [13, 14]. Термическая обработка является наиболее значимым, энергоемким и недостаточно исследованным этапом производства пеностекла. Она включает в себя этапы нагрева сырьевой смеси, вспенивания размягченной стекломассы и отжига пеностекла. На этот этап влияют факторы, связанные с теплообменными процессами, происходящими во время нагрева и вспенивания сырьевой смеси пеностекла, с образованием расплава в процессе вспенивания, и факторы, зависящие от условий стабилизации ячеистой струк-

туры и отжига пеностекла. Выбор метода моделирования процессов термообработки представлен на рисунке 4.

Стадия термической обработки (ТО) является приоритетной, поскольку именно на этой стадии формируются основные свойства и эксплуатационные характеристики пеностекла. Уровень проработки изучения данной стадии определяет возможность контроля и управления процессом ТО, а, следовательно, и эксплуатационными свойствами будущего материала. Сложность учета всех вышеперечисленных факторов вызывает необходимость создания упрощенных (приближенных) математических моделей. Широко применяемым подходом является замена решения задачи сопряженного переноса теплоты внутри твердого тела и в пограничном слое, обтекающем его теплоносителем, решением краевой задачи взаимосвязанного переноса в материале. Влияние теплоносителя учитывается в граничных условиях с использованием величин, определенных в соответствии с законами теплоотдачи. Однако, наиболее распространенные математические модели и методы [15, 16] позволяют моделировать макрофизические параметры процессов высокотемпературной обработки пеностекла. В работе [17] был представлен альтернативный подход, в котором оценка напряженно-деформированного состояния пеностекла осуществлялась численным методом на основе температурных кривых отжига. Ценность решений краевых задач теплопереноса в высокой степени определяется экспериментальными данными, особенно, зависимостями коэффициентов переноса, в частности теплопроводности, от потенциалов переноса [18]. В отечественной науке исторически существуют и развиваются два основных направления: «зональный» метод, разрабатываемый профессором С.П. Рудобаштой и его научной школой [19], и метод «микропроцессов», разрабатываемый академиком РААСН С.В. Федосовым [20]. «Зональный» метод и метод «микропроцессов» имеют схожую сущность, но различаются в ряде аспектов. В «зональном» методе весь диапазон влагосодержаний разбивается на концентрационные зоны, и значения теплофизических характеристик материала выбираются на основе среднего влагосодержания в каждой зоне. В методе «микропроцессов» используются интервалы времени, поэтому для каждой концентрационной зоны необходимо сначала рассчитать конечное влагосодержание, затем определить среднее влагосодержание и на его основе определить значения теплофизических характеристик и так далее. Оба метода были разработаны для учета изменений тепло- и массопереноса в

материале. Изменения зависят от влагосодержания и температуры материала. Методы могут

быть использованы для эффективного решения задачи моделирования.

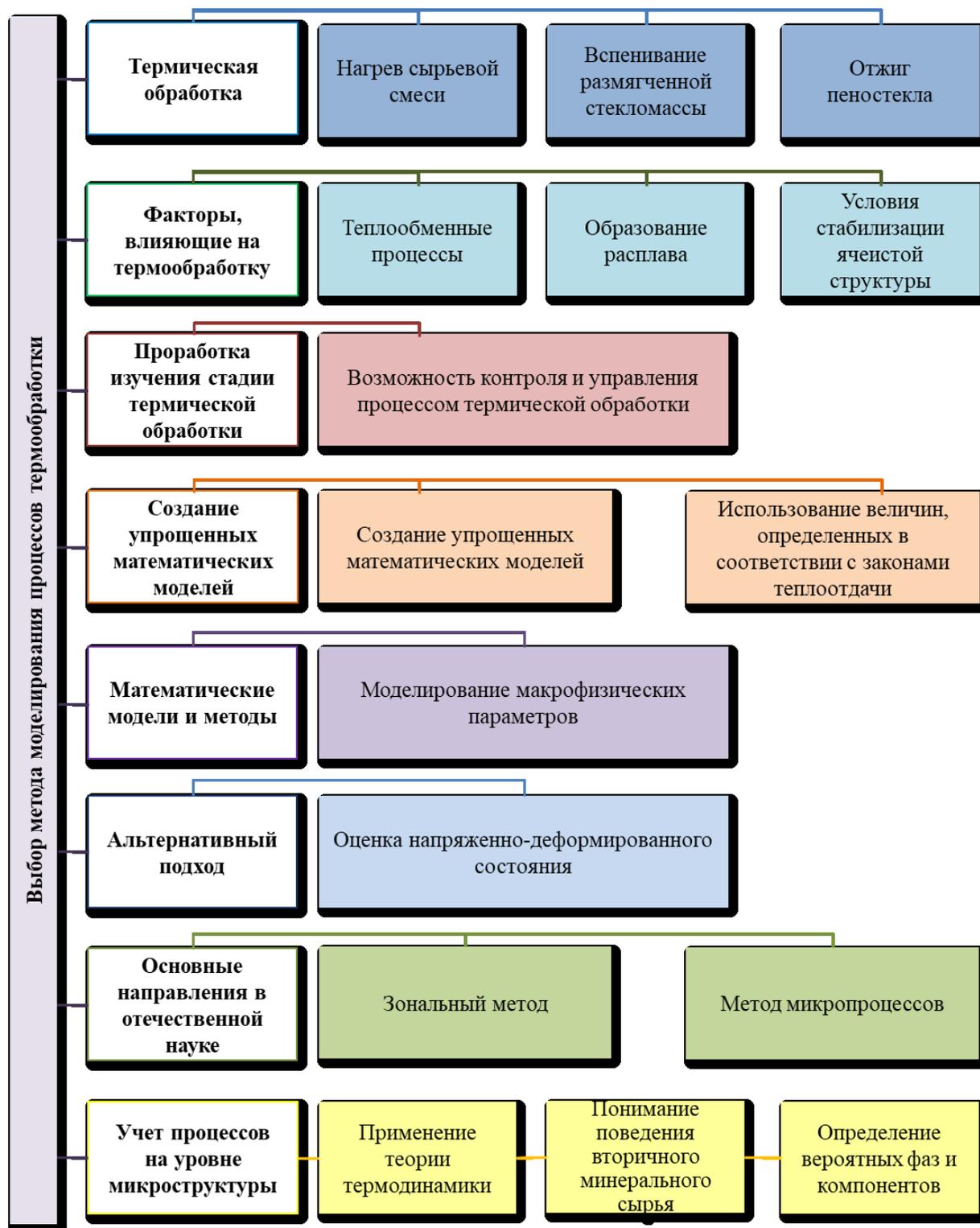


Рис. 4. Выбор метода моделирования процессов термообработки

При этом, с точки зрения необходимости учета процессов на уровне микроструктуры, следует расширить спектр используемых методов подходами на базе теории термодинамики. Для применения вторичного минерального сырья в технологическом процессе получения пено-

стекла, подразумевающим нагревание, необходимо понимание его поведения, в частности, вероятные фазовые переходы и преобразования. Следовательно, необходимо определение вероятных фаз и компонентов золошлаковой смеси, образующихся в процессе ее плавления. Для этого

целесообразно рассмотрение с позиций термодинамики процесса структурно-вещественного преобразования кремнийсодержащих отходов. Такие имитационные модели позволят установить закономерности протекания физических процессов и химических реакций, определить оптимальную температуру плавления, состав расплавов и исходной шихты.

Шихтовые составы для получения пеностекла включают стеклобой, как основной стеклообразующий компонент, золошлаковую смесь (ЗШС), как частичную замену стеклобоя, антрацит как порообразователь, MgO как модификатор, натрий тетраборнокислый 10-водный $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – для снижения температуры плавления, Cr_2O_3 и ZrO_2 , как катализаторы кристаллизации, мел технический в качестве дополнительного источника кальция для формирования кристаллических фаз.

Основная часть. В работе предлагается методология разработки и производства пеностекла, которая представляет собой многоступенчатый процесс, начинающийся с детального анализа свойств и влияния различных компонентов сырьевой шихты на структуру и свойства конечного продукта. Этот анализ позволяет определить оптимальные соотношения и типы компонентов сырьевой шихты для достижения требуемых характеристик пеностекла. Следующим этапом является оптимизация состава сырьевой шихты и режимов термообработки, что включает в себя выбор температурных режимов и времени обработки для формирования структуры пеностекла с заданными эксплуатационными свойствами. Для поддержки этого процесса используется математическая модель, которая позволяет прогнозировать свойства пеностекла на основе

входных параметров, таких как химический состав сырьевых компонентов и данные температурно-временного режима получения пеностекла. Применение современных методов анализа, включая рентгенофазовый анализ для изучения фазового состава, микротомографическое сканирование для визуализации структуры и термический анализ для определения тепловых свойств, обеспечивает глубокое понимание структуры и свойств пеностекла. Далее, с помощью статистического анализа и машинного обучения анализируются собранные данные для выявления закономерностей между составом сырьевой смеси, условиями получения пеностекла и его свойствами, что позволяет уточнить технологические параметры и повысить качество пеностекла. На заключительном этапе формулируются рекомендации по оптимизации технологических параметров, направленные на снижение затрат при сохранении или даже улучшении эксплуатационных характеристик пеностекла. Таким образом, предложенная методология обеспечивает комплексный подход к управлению процессом производства пеностекла, направленный на достижение высоких эксплуатационных характеристик при снижении затрат.

Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС (Ростовская область, г. Новочеркасск). Химический состав золошлаковой смеси представлен кремнием, алюминием, железом, калием, кальцием (табл. 1). Параметры кристаллических фаз, содержащихся в золошлаковой смеси, представлены в таблице 2. Степень кристалличности исследуемого образца золошлаковой смеси равна 59,6 %. Результаты исследования иных характеристик представлены в [21].

Таблица 1

Химический состав золошлаковой смеси

Оксид	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Значение	57,13	0,88	21,46	10,55	0,12	1,73	2,90	1,11	3,28
Оксид	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI	SUM	–
Значение	0,13	0,14	0,07	0,03	0,02	0,01	0,43	99,99	–

Таблица 2

Параметры обнаруженных кристаллических фаз в золошлаковой смеси

Кристаллическая фаза	Химическая формула	Массовая доля, мас. %	Размер, нм
Кварц	SiO ₂	74,0	64,6
оксид железа (II, III)	Fe ₃ O ₄	10,1	16,0
оксид алюминия калия	Al ₉ KO _{9,5}	15,9	74,2

С учетом полученных результатов и анализа научно-технической литературы [22–25] и ранее выполненных исследований [6, 7] определен температурно-временной режим синтеза (рис. 5),

спроектированы составы шихт для получения пеностекла с различной долей содержания кристаллической фазы в аморфной структуре (табл. 3).

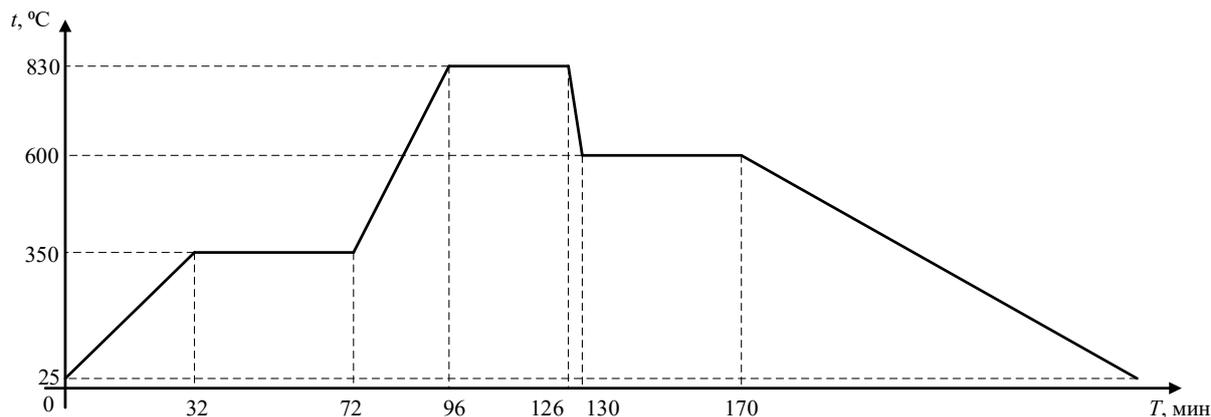


Рис. 5. Температурный режим синтеза

Таблица 3

Шихтовые составы для получения пеностекла

Состав	Компоненты, масс. %							
	ЗШС	Стеклобой	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Антрацит	Мел	ZrO_2	MgO	Cr_2O_3
0	26	60	8	6	–	–	–	–
1	26	60	8	6	–	–	–	0,7
2	26	60	8	6	–	–	–	0,9
3	26	60	8	6	1,7	0,3	–	–
4	26	60	8	6	4,3	0,3	–	–
5	26	60	8	6	1,7	–	0,3	–
6	26	60	8	6	4,3	–	0,3	–
7	26	60	8	6	1,7	–	–	0,3
8	26	60	8	6	4,3	–	–	0,3

Составы шихт для пеностекла разработаны таким образом, чтобы установить зависимость факторов, оказывающих влияние на кристаллизацию межпорowych перегородок. Введение инициаторов кристаллизации и модификаторов в шихтовые составы дает возможность оценки их влияния на параметры кристаллической фазы в аморфной структуре материала.

Исследования пространственной макро- и микроструктуры пеностекла выполнены с использованием микротомографического анализа. В качестве примера на рисунке 6 представлены результаты для нулевого состава пеностекла.

По результатам микротомографического исследования для образцов пеностекла проведен анализ распределения пор в пространстве, а также соотношения количества пор от их размера. Результаты наглядно демонстрируют равномерное распределение кристаллической фазы в каркасе материала.

Задача имитационного моделирования решена с использованием метода минимизации изобарно-изотермического потенциала Гиббса в программном комплексе «Селектор-С». Адекватность модели проверена расчетом трех точек на

трехкомпонентной диаграмме, которая демонстрирует состояние $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в используемом программном комплексе «Селектор-С». Расчеты проведены при температуре 850 °С. Результаты расчета достаточно согласуются с экспериментальными данными известных диаграмм состояния. Получены численные значения количества вероятных фаз и компонентов, образующихся в процессе синтеза образцов пеностекла. Техника формирования модели и проведение численных экспериментов – определение начальных условий и ограничений, задание р,Т-сценариев процессов и анализ результатов имитации, подробно описаны в [26]. Кроме того, для каждого состава шихты пеностекла определены закономерности протекания физических процессов и химических реакций в процессе создания пеностекла, в частности, последовательность образования кристаллических фаз посредством применения физико-химического моделирования, реализованного в программном комплексе «Селектор-С». Исследованы температурные условия процесса и химический состав исходного сырья, как наиболее значимые составляющие технологического процесса. Для повышения эффективности автоматического управления

технологическими этапами необходимы инструменты контроля, основанные на методе физико-химического моделирования. Термодинамическое моделирование взаимодействия компонентов исходной шихты выполнено для температур: 360 °С, 400 °С, 600 °С, 700 °С, 800 °С, 860 °С и разработанных составов, отличающихся техно-

логическими добавками [27]. Анализ полученных результатов показал отсутствие необходимости корректировки температурно-временного режима и оптимальность подобранных модификаторов для экспериментальной проверки возможности управления кристаллической фазы в аморфной структуре.

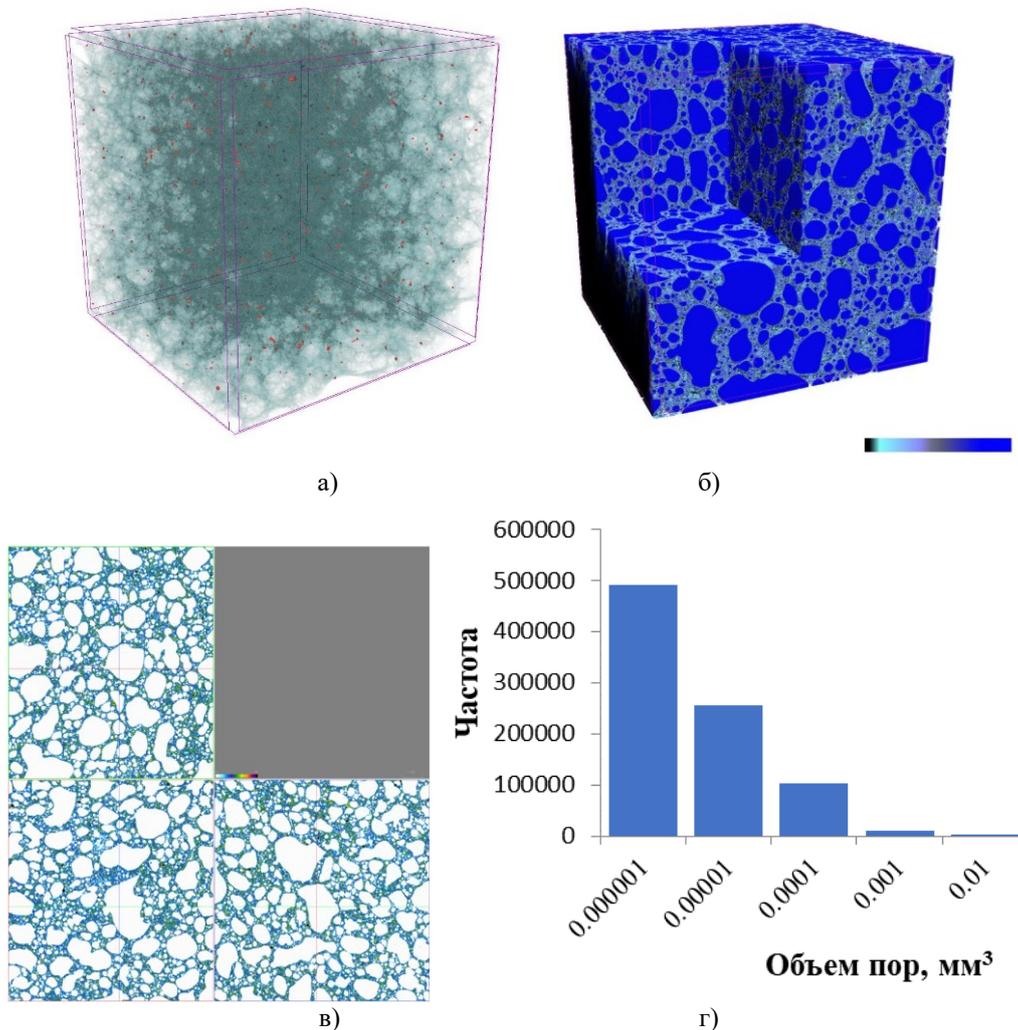


Рис. 6. Микроструктура нулевого образца:

- а) визуализация распределения частиц с высокой плотностью (выделено красным) в объеме образца,
- б) визуализация распределения пор в образце (в 2D срезах), размер образца 10 мм,
- в) визуализация распределения пор в объеме образца, цветом кодируется размер пор от черного (наименьшие) к синему (наибольшие) (цветовая шкала снизу справа),
- г) гистограммы распределения объема пор по количеству (частота встречаемости)

Изучение закономерности влияния микроструктуры пеностекла на его эксплуатационные свойства выполнено с применением регрессионного и корреляционного анализов. В качестве примера приведена регрессионная модель зависимости количества кристаллической фазы от со-

держания оксидов в исходной шихте, характеризующая значимость компонентов и оказываемое на нее влияние. Положительный знак коэффициента перед переменной означает, что повышение количества оксида приведет к увеличению содержания кристаллической фазы в каркасе пеностекла.

$$K(x_{компл}) = 6.88 \cdot x_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - 3.19 \cdot x_{\text{CaO}} + 2.33 \cdot x_{\text{MgO}} + 2.22 \cdot x_{\text{ZrO}_2} + 2.22 \cdot x_{\text{P}_2\text{O}_5} - 1.95 \cdot x_{\text{K}_2\text{O}} - 1.79 \cdot x_{\text{BaO}} + 1.72 \cdot x_{\text{V}_2\text{O}_5} + 1.17 \cdot x_{\text{SO}_3} - 1.04 \cdot x_{\text{Na}_2\text{O}} + 0.72 \cdot x_{\text{SiO}_2} + 0.67 \cdot x_{\text{TlO}_2} - 0.66 \cdot x_{\text{B}_2\text{O}_3} + 0.25 \cdot x_{\text{Al}_2\text{O}_3} + 0.08 \cdot x_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + 0.002 \cdot x_{\text{MnO}} + 4.39. \quad (1)$$

Выводы. Выдвинута следующая научная гипотеза: управление прочностными свойствами пеностекла возможно путем создания гетерогенной структуры, включающей кристаллические фазы определенных параметров. С практической точки зрения одновременно необходимо соблюдать существующие тенденции к снижению стоимости продукта. Многочисленными исследованиями доказано, что применение вторичного минерального сырья в качестве замены компонентов природного происхождения ожидаемо приведет к снижению стоимости пеностекла.

Установлены адекватные методы исследования вторичного минерального сырья, изучения их микро-, макроструктуры и эксплуатационных свойств образцов, исследования влияния микроструктуры пеностекла (количество кристаллической фазы, размер кристаллов и др.) на его эксплуатационные. Сформирована единая методология, позволяющая решать задачу проектирования новых материалов при использовании отходов различного состава, особенное внимание в которой уделено задаче разработки состава исходной шихты и температурно-временного режима синтеза пеностекла.

Данную задачу следует решать итерационно – методом последовательного приближения путем анализа литературных источников для выбора температурно-временного режима и дополнительных элементов (модификаторов) исходного состава шихты «нулевого приближения», моделирования процессов термообработки, анализа результатов и корректировки температурно-временного режима с последующим переходом к предыдущим этапам в случае необходимости.

Проанализированы существующие методы моделирования на макроуровне. Определено, что с точки зрения необходимости учета процессов на уровне микроструктуры, следует расширить спектр используемых методов подходами на базе теории термодинамики.

Для подтверждения предложенной методологии выполнена разработка материала на примере золошлаковой смеси ТЭС в г. Новочеркаске. Задача имитационного моделирования решена с использованием метода минимизации изобарно-изотермического потенциала Гиббса. Анализ полученных результатов показал отсутствие необходимости корректировки температурно-временного режима и оптимальность подобранных модификаторов для экспериментальной проверки возможности управления кристаллической фазы в аморфной структуре.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить особенности процессов формирования микроструктуры пеностекла.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность за научные консультации, оказанные при проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также при обсуждении результатов работы научному консультанту, академику РААСН, доктору технических наук, профессору Федосову Сергею Викторовичу и советнику РААСН, доктору технических наук, доценту Баканову Максиму Олеговичу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цопа Н.В., Шаленный В.Т., Степанцова В.В. Оценка сравнительной эффективности утепления и отделки стен пеностеклом или пенополистиролом на примере многоэтажного дома в г. Феодосии // Экономика строительства и природопользования. 2023. № 3(88). С. 55–64.
2. Шаленный В.Т., Степанцова В.В., Халилов А.Э. Усовершенствованная конструктивно-технологическая система утепления и отделки наружных стен изделиями из пеностекла и её окупаемость // Строительство и техногенная безопасность. 2023. № 28(80). С. 29–36.
3. Трифонов Е.Г., Шухардин А.А. Анализ теплоизоляционных материалов для резервуаров сжиженного природного газа // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2022. № 2(18). С. 17–27.
4. Tokach Y.E., Evtushenko E.I., Vyrodov O.S. Features of Structural Formation and Properties of Technogenic Raw Materials in Construction Material Production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. Pp. 022013. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022013.
5. Онищук В.И., Лазарова Ю.С., Евтушенко Е.И. Оценка возможности использования золы Рефтинской ГРЭС в производстве непрерывного стекловолокна // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 71–81. DOI 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81.
6. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 77. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83.
7. Марков А.Ю., Строкова В.В., Безродных А.А., Степаненко М.А. Свойства топливных зол различных типов как компонентов битумной эмульсии // Строительство и реконструкция. 2020. № 2(88). С. 67–76. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76.
8. Красновских М.П., Паршуков А.М., Лебедева Д.А., Вараксин К.М., Мокрушин И.Г. Опыт получения стеновой керамики с добавлением карбонатсодержащих отходов // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 9. С. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-40-45.

9. Рахимов Р.В., Абдуллаев Б.А., Жумабеков Б.Ш., Эргашева В.В., Рузметов М.К. Сравнение рентгеновской компьютерной томографии и металлографии для определения размера пор // *Металлург*. 2023. № 6. С. 94–100. DOI: 10.52351/00260827_2023_06_94.
10. Шаванов Н.Д., Панков П.П., Бесполитов Д.В., Коновалова Н.А., Евсюков С.А., Авсеенко Н.Д., Фаткулин А.А., Лушпей В.П. Утилизация паровозных шлаков в составах композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2024. № 1(91). С. 63–73. DOI: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.063-073.
11. Баканов М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2021. № 2(18). С. 87–102.
12. Баканов М.О. Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 2: Формирование пористой структуры на стадии вспенивания // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2021. № 3(19). С. 89–102.
13. Логачев К.И., Зиганшин А.М., Тирон О.В., Аверкова О.А., Попов Е.Н., Уваров В.А., Гольцов А.Б. Численное определение границ вихревых зон на входе в круглые отсосы-распределители над плоскостью // *Строительство и технологическая безопасность*. 2022. № S1. С. 251–260.
14. Кушев Л.А., Уваров В.А., Рамазанов Р.С., Саввин Н.Ю. Моделирование процесса подсоса первичного воздуха в бытовой газовой горелке на биогазовом топливе // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2022. № 2(66). С. 49–56. DOI: 10.36622/VSTU.2022.66.2.004.
15. Грушко И.С. Исследование напряжений пеностекла с учетом тепловых нагрузок при отжиге // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2018. № 2(198). С. 90–95.
16. Федосов С.В., Баканов М.О. Моделирование процессов теплопроводности и диффузии в телах канонической формы с применением метода «микропроцессов» для области малых значений числа Фурье // *Изв. вузов. Химия и хим. Технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 78–83.
17. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС, 2013. 478 с.
18. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
19. Грушко И.С. Теоретическое и практическое изучение золошлаковой смеси ТЭС Ростовской области как сырьевого материала для производства пеностекла // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2020. № 4(81). С. 168–186.
20. Сопегин Г.В., Рустамова Д.Ч., Федосеев С.М. Анализ существующих технологических решений производства пеностекла // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 12. С. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609.
21. Пат. 2485058 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ получения теплоизоляционного облицовочного материала на основе пеностекла / Пучка О.В., Бессмертный В.С., Степанова М.Н., Калмыкова Е.В., Сергеев С.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский гос. технологический ун-т им. В.Г. Шухова. № 2011145010/03; заявл. 07.11.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
22. Пат. 2503647 Российская Федерация, МПК С04В 38/08. Способ получения строительного материала / Дамдинова Д.Р., Давлетбаев М.А., Павлов В.Е., Алексеева Э.М.; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский гос. ун-т технологий и управления. № 2012133577/03; заявл. 06.08.2012; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
23. Пат. 2697981 Российская Федерация, МПК С03В 19/08, С03С 11/00. Способ получения пеностекла / Онищук В.И., Гливуц А.С., Гливуц Е.А., Дороганов В.А., Коробанова Е.В., Мишин Д.А.; заявитель и патентообладатель Белгородский гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова. - № 2018143212; заявл. 05.12.2018; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24.
24. Грушко И.С., Маслаков М.П. Формирование кристаллической фазы в матрице пеностекла и ее влияние на эксплуатационные свойства материала // *Стекло и керамика*. 2018. № 12. С. 10–16.
25. Грушко И.С. Пути формирования и особенности развития кристаллической фазы в аморфном материале // *Физика и химия стекла*. 2020. Т. 46. № 6. С. 585–604. DOI: 10.31857/S0132665120060104.
26. Grushko I.S., Bychinskii V.A., Chudnenko K.V. Physicochemical Simulation of the Melting Process of Silicon-Containing Waste from the Energy Complex // *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2021. Vol. 73. No 10. Pp. 3000–3009. DOI: 10.1007/s11837-021-04820-w.
27. Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С., Бычинский В.А. Моделирование физико-

химических процессов при синтезе пеностекла различных модификаций: фазовый анализ и прогнозирование свойств // Construction and

Geotechnics. 2023. Т. 14. № 4. С. 19–33. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.02.

Информация об авторах

Грушко Ирина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленное гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение. E-mail: grushkois@gmail.com. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Провещения, д. 132.

Поступила 29.07.2024 г.

© Грушко И.С., 2024

Grushko I.S.

Platov South-Russian state polytechnic university (NPI)

E-mail: grushkois@gmail.com

THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL BASIS OF THE PROCESSES OF FORMING THE MICROSTRUCTURE OF FOAM GLASS USING SECONDARY MINERAL RAW MATERIALS

Abstract. *Increasing the strength of foam glass to values sufficient for using it not only as a heat-insulating but also a structural material will significantly expand the scope of its application and reduce the material intensity of construction. The solution is possible due to the formation of a controlled and predictable heterogeneous amorphous-crystalline structure. The effect of the crystalline phase on the structure and strength of foam glass is contradictory and requires significant attention. At the same time, it is necessary to take into account the already obtained research results on reducing the cost of the material due to the use of waste. However, the composition of waste from various landfills varies, so a universal methodology for the development of materials is needed. A unified methodology is proposed that allows solving the problem of designing new materials using waste of various compositions, special attention is paid to the problem of synthesizing the composition of the initial batch and the temperature-time mode of foam glass synthesis. To confirm the proposed methodology, the material was developed using the example of ash and slag mixture of the TPP in Novocherkassk. The obtained foam glass samples and the research results were used to establish the features of the processes of formation of the foam glass microstructure using the regression analysis method.*

Keywords: *foam glass, crystalline phase, physical and chemical modeling, crystallization initiator, modifier*

REFERENCES

1. Copa N.V., Shalenij V.T., Stepanova V.V. Evaluation of the comparative efficiency of insulation and finishing of walls with foam glass or expanded polystyrene using the example of a multi-storey building in Feodosia [Ocenka sravnitel'noj effektivnosti utepleniya i otdelki sten penosteklom ili penopolistiroлом na primere mnogoetazhnogo doma v g. Feodosii]. Economics of construction and nature management. 2023. No. 3(88). Pp. 55–64. (rus)

2. Shalennyj V.T., Stepanova V.V., Halilov A.E. Improved design and technological system for insulation and finishing of external walls with foam glass products and its payback [Uovershenstvovannaya konstruktivno-tehnologicheskaya sistema utepleniya i otdelki naruzhnyh sten izdeliyami iz penostekla i eyo okupaemost']. Construction and technological safety. 2023. No. 28(80). Pp. 29–36. (rus)

3. Trifonov E.G., SHuhardin A.A. Analysis of thermal insulation materials for liquefied natural gas tanks [Analiz teploizolyacionnyh materialov dlya

rezervuarov szhizhennogo prirodnoгo gaza]. Bulletin of the young scientist of USPTU. 2022. No. 2(18). Pp. 17–27. (rus)

4. Tokach Y.E., Evtushenko E.I., Vyrodov O.S. Features of Structural Formation and Properties of Technogenic Raw Materials in Construction Material Production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. 022013. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022013.

5. Onishchuk V.I., Lazarova Yu.S., Evtushenko E.I. Assessment of the possibility of using ash from Reftinskaya GRES in the production of continuous fiberglass [Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya zoly Reftinskoj GRES v proizvodstve nepreryvnogo steklovolokna]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 5. Pp. 71–81. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-71-81. (rus)

6. Markov A.Yu., Strokova V.V., Markova I.Yu. Evaluation of the properties of fuel ashes as components of composite materials [Ocenka svoystv toplivnyh zol kak komponentov kompozicionnyh materialov]. Construction Materials. 2019. No. 4. Pp.

77. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83. (rus)

7. Markov A.Yu., Strokovaya V.V., Bezrodnih A.A., Stepanenko M.A. Properties of fuel ashes of different types as components of bitumen emulsion [Svoystva toplivnykh zol razlichnykh tipov kak komponentov bitumnoj emul'sii]. Construction and reconstruction. 2020. No. 2(88). Pp. 67–76. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-88-2-67-76. (rus)

8. Krasnovskikh M.P., Parshukov A.M., Lebdeva D.A., Varaksin K.M., Mokrushin I.G. Experience in obtaining wall ceramics with the addition of carbonate-containing waste [Opyt polucheniya stenovoy keramiki s dobavleniem karbonatsoderzhashchih othodov]. Ecology and industry of Russia. 2023. Vol. 27. No. 9. Pp. 40–45. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-9-40-45. (rus)

9. Rahimov R.V., Abdullaev B.A., Zhumabekov B.Sh., Ergasheva V.V., Ruzmetov M.K. Comparison of X-ray computed tomography and metallography for pore sizing [Sravnenie rentgenovskoy komp'yuternoy tomografii i metallografii dlya opredeleniya razmera por]. Metallurgist. 2023. No 6. Pp. 94–100. DOI: 10.52351/00260827_2023_06_94. (rus)

10. Shavanov N.D., Pankov P.P., Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Evsyukov S.A., Avseenko N.D., Fatkulina A.A., Lushpej V.P. Utilization of locomotive slag in composite materials for strengthening the roadbed of a railway track [Utilizatsiya parovoznykh shlakov v sostavah kompozitsionnykh materialov dlya usileniya zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puti]. Issues of modern science and practice. Vernadsky University. 2024. No. 1(91). Pp. 63–73. DOI: 10.17277/voprosy.2024.01.pp.063-073 (rus)

11. Bakanov M.O. Modeling of high-temperature processes in foam glass technology. Part 1: Formation of dynamics of cyclic non-stationary two-dimensional temperature fields [Modelirovanie vysokotemperaturnykh processov v tekhnologii penostekla. CHast' 1: Formirovanie dinamiki ciklicheskih nestacionarnykh dvumernykh temperaturnykh polej]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2021. No. 2 (18). Pp. 87–102. (rus)

12. Bakanov M.O. Modeling of high-temperature processes in foam glass technology. Part 2: Formation of a porous structure at the foaming stage [Modelirovanie vysokotemperaturnykh processov v tekhnologii penostekla. CHast' 2: Formirovanie poristoy struktury na stadii vspenivaniya]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2021. No. 3 (19). Pp. 89–102. (rus)

13. Logachev K.I., Ziganshin A.M., Tiron O.V., Averkova O.A., Popov E.N., Uvarov V.A., Goltsov

A.B. Numerical determination of the boundaries of vortex zones at the entrance to round bell-shaped exhaust hoods above a plane [CHislennoe opredelenie granic vihrevykh zon na vhode v kruglye otsosy-rastruby nad ploskost'yu]. Construction and technological safety. 2022. No. S1. Pp. 251–260. (rus)

14. Kushchev L.A., Uvarov V. A., Ramazanov R. S., Savvin N. Yu. Modeling the process of primary air suction in a domestic gas burner on biogas fuel [Modelirovanie processa podsosa pervichnogo vozduha v bytovoj gazovoj gorelke na biogazovom toplive]. Scientific journal of construction and architecture. 2022. No. 2 (66). Pp. 49–56. DOI: 10.36622/VSTU.2022.66.2.004. (rus)

15. Grushko I. S. Study of stresses in foam glass taking into account thermal loads during annealing [Issledovanie napryazhenij penostekla s uchedom teplovykh nagruzok pri otzhige]. News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences. 2018. No. 2 (198). Pp. 90–95. (rus)

16. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Modeling of heat conduction and diffusion processes in bodies of canonical form using the "microprocesses" method for the region of small values of the Fourier number [Modelirovanie processov teploprovodnosti i diffuzii v telah kanonicheskoy formy s primeneniem metoda «mikroprocessov» dlya oblasti malyykh znachenij chisla Fur'e]. News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology. 2021. Vol. 64. No. 10. Pp. 78–83. (rus)

17. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffusion in chemical engineering processes [Diffuziya v himiko-tekhnologicheskikh processah]. Moscow: KoloC, 2013. 478 p. (rus)

18. Fedosov S.V. Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry [Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh processah stroitel'noy industrii]. Ivanovo: IPK «PresCto», 2010. 363 p. (rus)

19. Grushko I.S. Theoretical and practical study of ash and slag mixture of thermal power plants of the Rostov region as a raw material for the production of foam glass [Teoreticheskoe i prakticheskoe izuchenie zoloshlakovoy smesi TES Rostovskoy oblasti kak syr'evogo materiala dlya proizvodstva penostekla]. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2020. No 4(81). Pp. 168–186. (rus)

20. Sopegin G.V., Rustamova D.Ch., Fedoseev S.M. Analysis of existing technological solutions for the production of foam glass [Analiz sushchestvuyushchih tekhnologicheskikh reshenij proizvodstva penostekla]. MGSU Bulletin. 2019. Vol. 14, No. 12. Pp. 1584–1609. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1584-1609 (rus)

21. Patent 2485058 Russian Federation, IPC C03B 19/08, C03C 11/00. Method for producing a heat-insulating facing material based on foam glass [Sposob polucheniya teploizolyacionnogo oblicovochnogo materiala na osnove penostekla]. Puchka O. V., Bessmertny V. S., Stepanova M. N., Kalmykova E. V., Sergeev S. V.; applicant and patent holder Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. No. 2011145010/03; declared 07.11.2011; published 20.06.2013, Bulletin No. 17. (rus)

22. Patent 2503647 Russian Federation, IPC C04B 38/08. Method for producing building material [Sposob polucheniya stroitel'nogo materiala]. Damdinova D.R., Davletbaev M.A., Pavlov V.E., Alekseeva E.M.; applicant and patent holder East Siberian State University of Technology and Management. No. 2012133577/03; declared 06.08.2012; published 10.01.2014, Bulletin No. 1. (rus)

23. Patent 2697981 Russian Federation, IPC C03B 19/08, C03C 11/00. Method for producing foam glass [Sposob polucheniya penostekla] / Onishchuk V.I., Glivuk A.S., Glivuk E.A., Doroganov V.A., Korobanova E.V., Mishin D.A.; applicant and patent holder Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. No. 2018143212; declared 05.12.2018; published 21.08.2019, Bulletin No. 24. (rus)

24. Grushko I.S., Maslakov M.P. Formation of the crystalline phase in the foam glass matrix and its influence on the performance properties of the material [Formirovanie kristallicheskoj fazy v matrice penostekla i ee vliyanie na ekspluatacionnye svoystva materiala]. Glass and Ceramics. 2018. No. 12. Pp. 10-16. (rus)

25. Grushko I.S. Paths of formation and features of development of the crystalline phase in an amorphous material [Puti formirovaniya i osobennosti razvitiya kristallicheskoj fazy v amorfnom materiale]. Glass Physics and Chemistry. 2020. Vol. 46, No. 6. Pp. 585-604. DOI: 10.31857/S0132665120060104 (rus)

26. Grushko I.S., Bychinskii V.A., Chudnenko K.V. Physicochemical Simulation of the Melting Process of Silicon-Containing Waste from the Energy Complex. Journal of the Minerals Metals & Materials Society. 2021. Vol. 73. No. 10. Pp. 3000-3009. DOI 10.1007/s11837-021-04820-w.

27. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S., Bychinsky V.A. Modeling of physicochemical processes in the synthesis of foam glass of various modifications: phase analysis and prediction of properties [Modelirovanie fiziko-himicheskikh processov pri sinteze penostekla razlichnykh modifikacij: fazovyy analiz i prognozirovanie svoystv]. Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14, No. 4. Pp. 19-33. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.02 (rus)

Information about the authors

Grushko, Irina S. PhD. E-mail: grushkois@gmail.com. Platov South-Russian state polytechnic university (NPI). Russia, 346428, Rostov reg., Novocherkassk, Prosveshcheniya st., 132.

Received 29.07.2024

Для цитирования:

Грушко И.С. Теоретические и технологические основы процессов формирования микроструктуры пеностекла с использованием вторичного минерального сырья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 8-22. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22

For citation:

Grushko I.S. Theoretical and technological basis of the processes of forming the microstructure of foam glass using secondary mineral raw materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 8-22. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-8-22

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-23-32

¹Махортов Д.С., ¹Загороднюк Л.Х., ²Насонова В.В., ^{1,*}Сумской Д.А.
¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН
*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК С КОМПОНЕНТАМИ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО¹

Аннотация. Предложен механизм химического взаимодействия биологических добавок Д-1, Д-2, Д-3 с минеральными компонентами композиционного вяжущего, полученного совместной механоактивацией портландцемента и боя керамического кирпича. Добавки Д-1, Д-2 представляют собой продукты ферментативного гидролиза непищевых костей, копыт, шерсти, кожи крупнорогатого скота (КРС), отличающиеся только условиями гидролиза. Добавка Д-3 также продукт ферментативного гидролиза, но в качестве сырья использована непищевая кровь КРС. Цель ферментативного гидролиза – получение олигопептидов, молекулярная масса которых значительно меньше молекулярной массы исходных белковых структур, и увеличение количества гидрофильных групп. Образуются поверхностно-активные вещества с гидрофильными группами: NH₂ (аминогруппа) и COOH (карбоксильная группа). Добавки Д-1 и Д-2 не проявили себя как активные компоненты в составе композиционного вяжущего, вследствие наличия в их составе значительного количества серосодержащих аминокислот: цистина и метионина. Добавка Д-3 содержит минимальное количество серосодержащих аминокислот. Установлено, что добавка Д-3, взаимодействуя с катионами неорганических компонентов портландцемента и боя керамического кирпича, образует структуру, встраивающуюся в каркас композиционного вяжущего, что обеспечивает пластифицирующие свойства цементному тесту и способствует формированию равномерно распределенной мелкозернистой структуры цементного камня, который приобретает повышенную прочность, что подтверждается результатами физико-механических испытаний.

Ключевые слова: ферментативный гидролиз, биологические добавки, цистеин, цистин, метионин, белки, аминокислоты, краевой угол смачивания, структура цементного камня

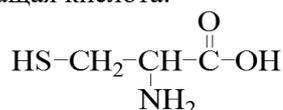
Введение. Для повышения качества и долговечности строительных объектов различного назначения требуется разработка новых эффективных строительных материалов и изделий, сочетающих высокие физико-механические и функциональные свойства при оптимальной стоимости [1–5]. Простым методом совершенствования свойств бетонов и растворов является модифицирование их различными добавками, эффективность которых доказана многолетним опытом [6–10]. Важную роль в строительной практике играют пластифицирующие добавки, которые обеспечивают высокие технологические и прочностные показатели [11–15]. Эти добавки могут иметь различное происхождение, являться побочными продуктами различных производственных процессов [16–20]. Несмотря на то, что к настоящему многие добавки достаточно изучены и имеется большой опыт их применения, проводится поиск и разработка новых добавок [21–25]. Определенный интерес для создания современных композитов представляют биологические пластифицирующие добавки [26].

Методология. В работе исследованы биологические добавки: Д-1, Д-2, Д-3, впервые синтезированные в лаборатории отдела научно-прикладных и технологических разработок ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН. Все эксперименты проводились совместно с названной лабораторией. Сравнительные исследования по определению краевого угла смачивания проводили на установке KRUSSEasyDrop DSA-30. Качество портландцемента, вяжущей композиции и композиционного вяжущего определяли по ГОСТ 30744-2001.

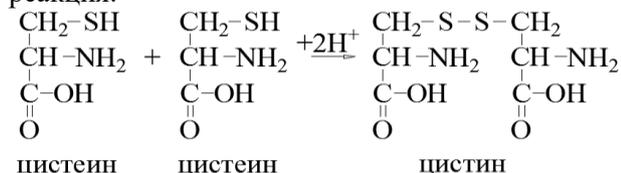
Основная часть. В проведенных ранее исследованиях были описаны биологические добавки и установлены особенности их влияния на технологические и физико-механические свойства композиционных вяжущих [27]. Существенное расхождение в числовых значениях нормальной густоты, сроков начала и конца схватывания, а также динамики нарастания прочностных показателей композиционных вяжущих, можно объяснить особенностями химического состава исследуемых добавок: Д-1, Д-2, Д-3.

¹ Результаты, изложенные в статье, были частично представлены при защите диссертационной работы Махортова Д.С. «Композиционные вяжущие для конструкционно-теплоизоляционных керамзитобетонов» (дата защиты 6.10.23), ранее в открытой печати не публиковались

Так, в добавках Д-1 и Д-2 отмечается повышенное содержание серы, вследствие значительного содержания кератина – особой системы межклеточных фибриллярных протеинов (белков). Добавки Д-1 и Д-2 являются продуктами ферментативного гидролиза непищевой составляющей крупного рогатого скота: кости, копыта, шерсть, кожа. Различие между этими добавками определяется временем и условиями гидролиза. Эти добавки характеризуются наличием значительного количества цистеина, входящего в состав α – кератинов, основного белка костей, ногтей, кожи и волос. Цистеин – это алифатическая серосодержащая кислота:

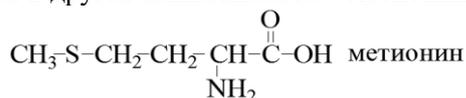


Вследствие наличия в составе цистеина высокореактивной SH-группы легко протекает ферментативная окислительно-восстановительная реакция:



Дисульфидная связь -S-S- часто образуется между двумя остатками цистеина внутри одной полипептидной цепи или между двумя полипептидными цепями. Взаимопревращения цистина в цистеин и наоборот осуществляется легко.

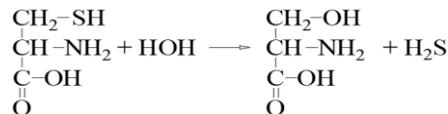
В цистин (через цистеин) может превращаться и другая аминокислота – метионин:



Следует отметить, что это превращение необратимое. Таким образом, в продуктах ферментативного гидролиза рогов, копыт и шерсти обнаруживаются цистин и метионин.

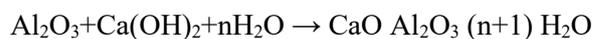
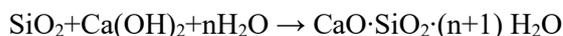
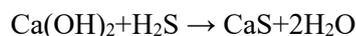
Добавки Д-1 и Д-2 не проявили себя положительно в композиционных вяжущих из-за значительного количества серосодержащих аминокислот. Молекула цистина изолирует компоненты

портландцементного клинкера и боя керамического кирпича, препятствуя их взаимодействию, а также идёт нежелательный процесс гидролиза цистеина:



Данный факт подтверждается результатами сроков схватывания композиционных вяжущих с использованием добавок Д-1 и Д-2, а также снижением показателей прочности при сжатии относительно композиционных вяжущих с добавкой Д-3.

Присутствие сероводорода нежелательно, т.к. он участвует в реакции образования CaS вместо целевых реакций по формированию гидросиликатов кальция и алюминия:



Для обеспечения протекания требуемых реакций гидратации необходимо исключить возможность образования CaS или снизить его количество до минимума. Это можно обеспечить путем использования белков с меньшим количеством серосодержащих аминокислот, разбавляя кератинсодержащие продукты, как это реализовано в добавке ЭСТ для бетонных смесей [9]. В её состав, кроме значительного количества серосодержащих белков шерсти, рогов, копыт, ввели животный протеин, получаемый из плазмы крови, роговицы.

Добавка Д-3 представляет собой смесь полипептидов (олигопептидов), молекулярная масса которых меньше молекулярной массы исходных белков крови.

В применяемой нами добавке Д-3 используется только белковый гидролизат крови крупного рогатого скота (КРС) с минимальным содержанием серосодержащих аминокислот: цистина, метионина. Кровь крупного рогатого скота имеет следующий химический состав (табл. 1).

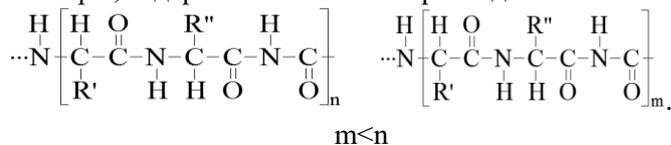
Таблица 1

Химический состав крови крупного рогатого скота

Состав крови	Количество, %	Состав крови	Количество, %
Вода	80,9	Кальций	0,006
Сухой остаток	19,1	Магний	0,003
Общее кол-во белков	17,3	Хлор	0,31
Гемоглобин	10,3	Фосфор общий	0,04
Сахар	0,07	Холестерин	0,19
Натрий	0,37	Лецитин	0,24
Калий	0,04	Жир	0,057
Железо	0,035	Жирные кислоты	–

Кровь КРС – это смесь белков определённого состава. В крови содержатся в основном: альбумин, глобулин и ферменты (ферменты – биологические катализаторы, содержатся в очень

малых количествах). Средняя молекулярная масса белков Д-3 до гидролиза более 250 кДа. В результате гидролиза альбумины и глобулины распадаются на более короткие олигопептиды:



Исходный альбумин имеет среднюю молекулярную массу 65 кДа, а исходный глобулин более 160 кДа. В результате гидролиза образуются продукты с меньшей молекулярной массой

от 5 до 15 кДа, что установлено методом электрофореза.

Состав аминокислот, установленный методом хроматографии (ГОСТ 34132-2017), приведен в таблице 2.

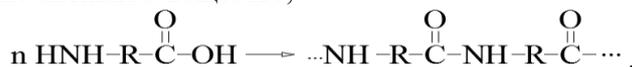
Таблица 2

Аминокислотный состав ферментативного гидролиза

№	Наименование аминокислот	Содержание связанных аминокислот (г/100 г продукта)	№	Наименование аминокислот	Содержание связанных аминокислот (г/100 г продукта)
1	Аспарагиновая кислота	4,05±0,61	10	Цистин	0,90±0,13
2	Глутаминовая кислота	10,44±1,57	11	Валин	3,06±0,46
3	Серин	2,25±0,34	12	Метионин	0,68±0,10
4	Гистидин	6,08±0,91	13	Фенилаланин	1,23±0,19
5	Глицин	0,96±0,14	14	Изолейцин	2,60±0,39
6	Треонин	4,80±0,72	15	Лейцин	4,80±0,72
7	Аргинин	2,23±0,34	16	Лизин	5,73±0,86
8	Аланин	3,40±0,51	17	Пролин	2,41±0,36
9	Тирозин	2,38±0,36	Всего		58,00±8,70

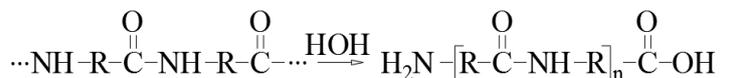
В результате ферментативного гидролиза наблюдается увеличение активных амино- и гидроксильных групп. При гидролизе образуется своеобразное поверхностно-активное вещество,

где роль гидрофобной структуры играет группа:

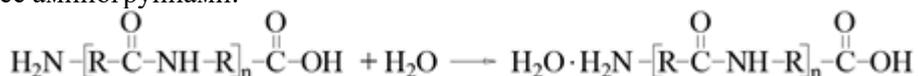


Взаимодействуя с водой, эта группа образует структуру с двумя гидрофильными группами:

-NH₂ (аминогруппа) и $\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$ (карбоксильная группа):



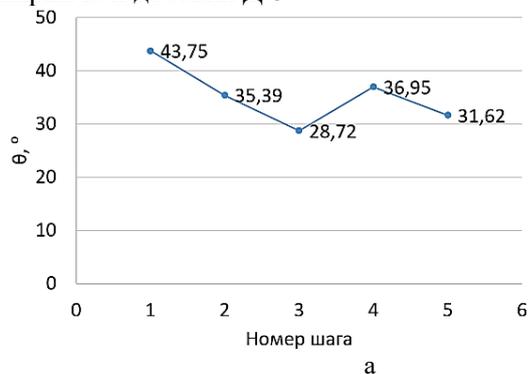
Компоненты добавки (полипептиды, аминокислоты) взаимодействуют с минералами портландцемента, боя керамического кирпича и водой, связывая её аминокруппами:



В процессе гидратационного твердения клинкерных минералов цемента биологическая добавка взаимодействует также с продуктами гидратации неорганических компонентов (портландцемента и боя керамического кирпича), оказывая определенное влияние на процессы схватывания вяжущего; процессы взаимодействия дисперсного порошка вяжущего с дисперсной

жидкой фазой, влияя на скорость тепловыделения, как критерия особенностей гидратации, исследуемых систем; на скорость процессов твердения; а также на формирование микроструктуры цементного камня. В ходе гидратации вода постепенно отщепляется от биологической добавки и вступает в химическое взаимодействие с образующимися минералами в сложной цементной системе.

Для определения технологических характеристик вяжущих с использованием ПАВ, в частности их пластифицирующих свойств, необходимо знать показатели угла смачивания. В связи с этим для определения степени гидрофобности поверхности исследуемых систем были определены показатели угла смачивания вяжущей композиции и композиционного вяжущего, приготовленных с применением боя керамического кирпича и добавки Д-3.



Определение краевого угла смачивания, проводили на установке KRUSSEasyDrop DSA-30.

На рисунке 1 представлена зависимость угла смачивания (Θ, °) от его измерения через определенный интервал времени (шагов) вяжущей композиции и композиционного вяжущего.

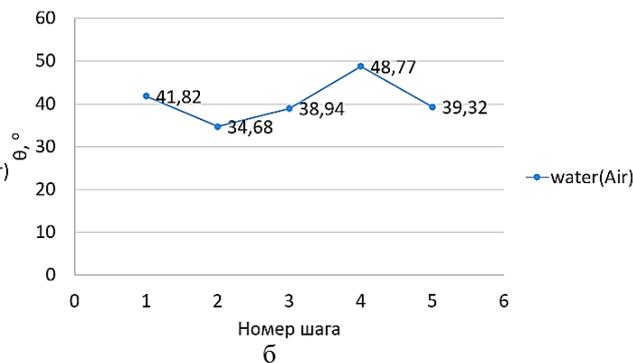


Рис. 1. Зависимость углов смачивания (Θ) вяжущей композиции (а) и композиционного вяжущего (б) от их измерения через определенный интервал времени (шагов)

Установлено, что показатель угла смачивания вяжущей композиции (цемент 90 % + бой керамического кирпича 10 %) составляет 35,29°.

Таким образом, исследования показали, что угол смачивания композиционного вяжущего (цемент 90 % + бой керамического кирпича 10 % + Д-3) имеет показатель 40,71°.

Согласно полученным данным, введение биологической добавки обеспечивает некоторое увеличение гидрофобности поверхности твердой фазы исследуемой системы состава: цемент 90 % + бой керамического кирпича 10 %, что выражается увеличением краевого угла смачивания поллярной жидкостью – водой (табл. 3).

Таблица 3

Показатели краевого угла смачивания вяжущей композиции и композиционного вяжущего

Вяжущие	Краевой угол смачивания водой (Θ _в), °	Свободная энергия поверхности, мН/м
Вяжущая композиция	35,29	68,12
Композиционное вяжущее	40,71	65,52

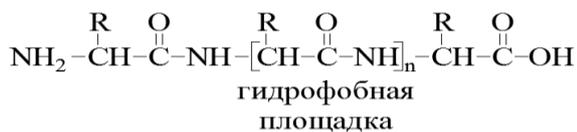
Это косвенно подтверждает высказанное предположение о том, что биологическая добавка, адсорбируясь на поверхности твердой фазы, выступает структурно-химическим фактором, препятствующим флокуляции частиц цемента и водной дисперсионной среды при его гидратации, а также конгломерации высокодисперсных частиц боя керамического кирпича. В

результате формируется система равномерно распределенной дисперсной фазы в виде частиц композиционного вяжущего в объеме водной среды.

Полученные данные хорошо согласуются с изменением свободной энергии поверхности (табл. 3): при введении добавки отмечается снижение свободной энергии, что свидетельствует о частичной «закупорке» активной поверхности твердой фазы. Однако, разница в значениях незначительна, что означает, что после перераспределения жидкой фазы тонкими прослойками на поверхности твердых частиц, активность последних сохраняется.

Учитывая особенность химического состава биологической добавки Д-3, изучен механизм химического взаимодействия ее с компонентами композиционного вяжущего. Белки – это полипептиды, проявляющие свойства ионогенных пластификаторов. Но в отличие от типичных ионогенных ПАВ (анионоактивных или катионоактивных) в макромолекуле белка присутствуют две гидрофильные группы: NH₂ (аминогруппа) и

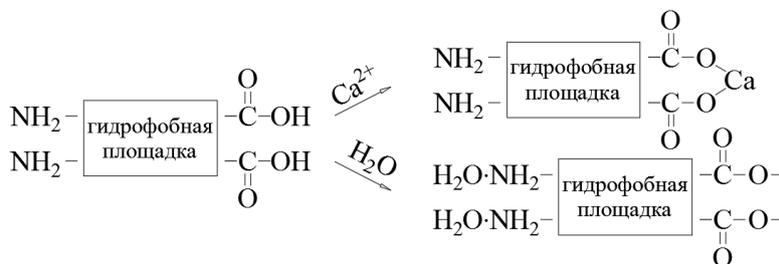




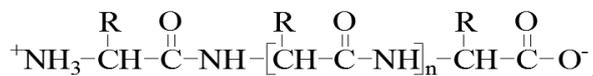
гидрофильная группа – NH₂ (носитель основных свойств) активно реагирует с водой и ионами кислотного характера (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ и др.), которые содержатся в плазме крови и в результате

ферментативного гидролиза контролируется в белковом гидролизате.

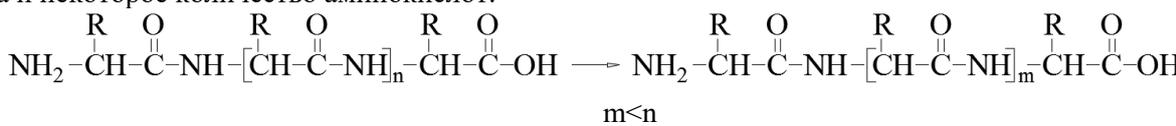
Карбоксильная группа – C(=O)-OH взаимодействует с катионами металлов (Na⁺, Ca²⁺, K⁺ и др.), которые также вследствие ферментативного гидролиза переходят в белковый гидролизат:



В водном растворе молекула белка образует бион:



В процессе ферментативного гидролиза макромолекула белка распадается на большое количество макромолекул меньшего молекулярного веса и некоторое количество аминокислот:



В водном растворе гидрофобная часть молекул значительно уменьшается, о чем свидетельствует слабая гидрофобизация поверхности композиционного вяжущего (табл. 3), но резко возрастает количество гидрофильных групп (–NH₂ и –C(=O)-OH), которые могут реагировать не только с анионами и катионами плазмы крови, но также с основными и кислотными структурами портландцемента и боя керамического кирпича, связывая воду на начальном этапе гидратации портландцемента. Аминогруппа постепенно отдает

воду, изменяя таким образом процесс гидратации, что несомненно влияет на прочность композиционного вяжущего, за счёт основной группы возможна также физическая адсорбция на кислотных структурах портландцемента.

Биологическая добавка Д-3, взаимодействуя с катионами неорганических компонентов, образует структуру, встраивающуюся в формирующийся каркас цементного камня (рис. 2), что влияет на его прочность, при этом образуется более упорядоченная и стабильная затвердевающая структура.

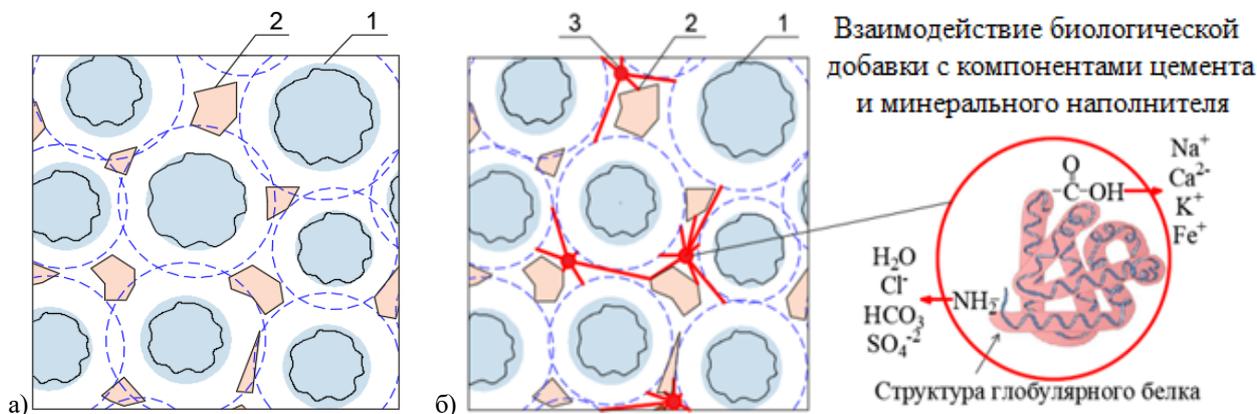


Рис. 2. Структура цементного камня вяжущей композиции (а) и композиционного вяжущего (б), 1 – зерна портландцемента; 2 – зерна минерального наполнителя; 3 – биологическая добавка

Сравнительные характеристики показателей прочности при сжатии образцов портландцемента и композиционного вяжущего (табл. 4) убедительно свидетельствуют, что присутствие биологической добавки в композиционном вяжущем способствует стабильному увеличению

прочности в возрасте 2 сут с 19,2 МПа до 45,69 МПа, а в возрасте 28 сут с 50,1 МПа до 121,58 МПа, что превосходят показатели прочности портландцемента в 2,38 раза и в 2,42 раза, соответственно.

Таблица 4

Сравнительные характеристики портландцемента, вяжущей композиции и композиционного вяжущего

Вяжущие	НГ, %	Сроки схватывания, мин		$R_{ср}$, кг/м ³	$R_{сж}$ 2 сут, МПа	$R_{сж}$ 28 сут, МПа
		начало	конец			
Портландцемент	25,6	95	308	2350	19,2	50,1
Вяжущая композиция	33,1	171	215	2277	37,26	98,05
Композиционное вяжущее	27,2	90	280	1905	45,69	121,58

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные составы композиционных вяжущих с использованием биологической добавки для изготовления бетонов и строительных растворов различного назначения.

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Биологические добавки Д-1 и Д-2 не проявили себя положительно в композиционных вяжущих из-за содержания в них значительного количества серосодержащих аминокислот, т.к. молекулы цистина изолируют минеральные компоненты портландцемента и боя керамического кирпича, препятствуя их химическому взаимодействию. При этом имеет место нежелательный процесс гидролиза цистеина с образованием сероводорода H_2S . Вместо формирования гидросиликатов кальция и алюминия образуется нежелательный ольдгамит CaS , что подтверждается результатами рентгенофазового анализа и снижением показателей прочности при сжатии образцов композиционных вяжущих.

2. Предложен механизм химического взаимодействия биологической добавки Д-3, синтезированной из крови КРС, с минеральными компонентами композиционного вяжущего. Добавка Д-3, взаимодействуя с катионами неорганических компонентов, образует структуру, встраивающуюся в каркас, что обеспечивает пластифицирующие свойства цементному тесту и способствует формированию равномерно распределенной мелкозернистой структуры цементного камня, обладающего повышенной прочностью, что подтверждается проведенными исследованиями.

3. Использование в качестве пластифицирующей биологической добавки Д-3 в составе композиционного вяжущего позволяет утилизировать непищевую кровь КРС, образующуюся на скотобойнях, тем самым снижая антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Благодарность. Авторы выражают глубокую благодарность д.х.н., профессору Е.Э. Потапову (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА) и канд. техн. наук, доценту И.В. Тихуновой (БГТУ им. В.Г. Шухова) за конструктивные и ценные советы, замечания и помощь в выполнении работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крамар Л.Я., Кудяков А.И., Трофимов Б.Я., Шудяков К.В. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог // Вестник ТГАСУ. 2017. № 4 (63). С. 147–157.
2. Кудяков В.А., Кудяков А.И., Лукьянчиков С.А., Кудяков К.Л. Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов // Вестник ТГАСУ. 2017. № 6 (65). С. 116–126.
3. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.A., Sarkisov J.S. Foam concrete of increased strength the thermomodifier peat additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 71(1). 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012012
4. Аниканова А.Л., Волкова О.В., Кудяков А.И., Курмангалиева А.И. Активированное композиционное фторангидридовое вяжущее // Строительные материалы. 2019. № 1-2. С. 36–42. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42
5. Машкин Н.А., Кудяков А.И., Бартеньева Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсноармированный минеральными и волокнистыми добавками // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 8. С. 58–68.
6. Макридин Н.И., Максимова И.Н., Овсянкова Ю.В. Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 2 // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 72–75.

7. Калашников В.И., Мороз М.Н., Тараканов О.В. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размотых с цементом или минеральными породами // *Строительные материалы*. 2014. № 9. С. 70–75.
8. Несветаев Г.В., Корчагин И.В., Потапова Ю.И. О влиянии суперпластификаторов на пористость цементного камня // *Научное обозрение*. 2014. № 7. С. 837–841.
9. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органо-минеральных модификаторов на цементные системы // *Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений*. 2017. № 1. С. 40–46.
10. Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 11. С. 75–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88
11. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials // *Life Science Journal*. 2014. Т. 11. № 12. С. 948–953.
12. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Шамшуров А.В., Беликов Д.А. Композиционные вяжущие на основе органо-минерального модификатора для сухих ремонтных смесей // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 5. С. 25–31.
13. Plank J., Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption // *Cement and Concrete Research*. 2007. Т. 37. № 4. С. 537–542.
14. Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х., Беликов Д.А., Щекина А.Ю., Куприна А.А. Эффективные сухие смеси для ремонтных и восстановительных работ // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 82–85.
15. Дугуев С.В. Механохимическая активация в производстве сухих строительных смесей // С.В. Дугуев, В.Б. Иванова // *Строительные материалы*. 2000. № 5. С. 28–30.
16. Дудынов С.В. Биологические добавки для строительных материалов // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 4. С. 95–198.
17. Русанов А.И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. С.-Пб.: Химия. 1992. 280 с.
18. Скрипкюнас Г., Яковлев Г.И., Карпова Е.А., Мохамед Э.А.Э.М. Изменение реологических свойств наномодифицированных цементных систем // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 43–50.
19. Ильина Л.В., Самченко С.В., Раков М.А., Зорин Д.А. Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальций-содержащими добавками // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15. № 5. С. 494–503. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503
20. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. Pp. 816–819. DOI: 10.3923/rjasci.2014.816.819
21. Баталин Б.С., Газетдинов Д.Р. Исследование влияния белкового пенообразователя на агрегативную устойчивость порландцемента // *Известия Вузов. Строительство*. 2008. № 6. С. 38–40.
22. Топчий Ю.С., Хабиров Д.М. Модифицированный белковый пластификатор для цементных систем // *Технологии бетонов*. 2013. № 11 (88). С. 46–47.
23. Елисеев С.А., Кучер Р.В. Поверхностно-активные вещества и биотехнология. Киев: Науковадумка, 1991. 116 с.
24. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // *Advanced Concrete Technology*. 2003. № 1. С. 5–15.
25. Song H., Pei Yu.V., Xiang M.K. Study on the compatibility of cement-superplasticizer system based on the amount of free solution // *Technological Sciences*. 2011. Т. 54. № 1. С. 183–189.
26. Morin V., Cohen F., Feylessouli A., Richard P. Superplasticizer effects on setting and structuration mechanisms of ultra high performance concrete // *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. Pp. 63–71.
27. Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А., Махортов Д.С. 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

Информация об авторах

Махортов Денис Сергеевич, кандидат технических наук. E-mail: denis-mahortov1995@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Насонова Виктория Викторовна, кандидат технических наук, руководитель отдела. E-mail: v.nasonova@fnrcps.ru. Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН. Россия, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26.

Сумской Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.06.2024 г.

© Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А., 2024

¹*Makhortov D.S.*, ¹*Zagorodnyuk L.Kh.*, ²*Nasonova V.V.*, ^{1,*}*Sumskoy D.A.*

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

²*Federal Scientific Center for Food Systems named after. V.M. Gorbatov RAS*

*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

MECHANISM OF CHEMICAL INTERACTION OF ORGANIC ADDITIVE OF BIOLOGICAL ORIGIN WITH COMPONENTS COMPOSITE BINDER

Abstract. A mechanism is proposed for the chemical interaction of an organic additive synthesized from the blood of cattle with the mineral components of a composite binder obtained by the joint mechanical activation of Portland cement and broken ceramic bricks. It has been established that the organic additive, interacting with the cations of inorganic components, forms a structure that is built into the frame, which provides plasticizing properties to the cement paste and contributes to the formation of a uniformly distributed fine-grained structure of the cement stone, which acquires increased strength, which is confirmed by the results of physical and mechanical tests. It has been determined that organic additives D-1 and D-2 are products of enzymatic hydrolysis of inedible bones, hooves, wool, and skin of cattle, differing in the time and conditions of hydrolysis. Additive D-3 is a mixture of polypeptides (oligopeptides), the molecular weight of which is less than the molecular weight of the original blood proteins and amino acids, which uses only protein hydrolyzate of cattle blood with a minimum content of sulfur-containing amino acids: cystine, methionine. As a result of hydrolysis, active amino and hydroxyl groups increase, which act as a surfactant; when interacting with water, these groups form a structure with two hydrosilicate groups: NH₂ (amino group) and (carboxyl group), which interact with the minerals of Portland cement, cullet ceramic brick and water, binding it with amino groups. Organic additive D-3, interacting with cations of inorganic components, contributes to the formation of a uniformly distributed fine-grained structure of cement stone, which has increased strength, which is confirmed by research.

Keywords: organic additives of biological origin, cysteine, amino groups, polypeptides, amino acids, contact angle, structure of cement stone

REFERENCES

1. Kramar L.Ya., Kudyakov A.I., Trofimov B.Ya., Shuldyakov K.V. Cement heavy concrete for the construction of high-speed roads [Tsementnye tyazhelye betony dlya stroitelstva skorostnykh avtomobilnykh dorog]. Bulletin of TGASU. 2017. No. 4 (63). Pp. 147–157. (rus)
2. Kudyakov V.A., Kudyakov A.I., Lukyanchikov S.A., Kudyakov K.L. Management of technological processes for the production of modified concrete [Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva modifitsirovannykh betonov]. Bulletin of TGASU. 2017. No. 6 (65). Pp. 116–126. (rus)
3. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.A., Sarkisov J.S. Foam concrete of increased strength the thermomodifier peat additives.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 71(1). 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012012

4. Anikanova A.L., Volkova O.V., Kudyakov A.I., Kurmangalieva A.I. Activated composite fluoroanhydrite binder [Aktivirovannoe kompozitsionnoe ftorangidritovoe vyazhushchee]. Construction materials. 2019. No. 1-2. Pp. 36–42. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-36-42. (rus)

5. Mashkin N.A., Kudyakov A.I., Barteneva E.A. Non-autoclaved foam concrete, dispersedly reinforced with mineral and fibrous additives [Nevtoklavnyy penobeton, dispersnoarmirovanny mineralnymi i voloknistymi dobavkami]. News of higher educational institutions. Construction. 2018. No. 8. Pp. 58–68. (rus)

6. Makridin N.I., Maksimova I.N., Ovsyukova Yu.V. Long-term strength of the modified structure of cement stone. Part 2 [Dolgovremennaya prochnost

modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya]. Construction materials. 2011. No. 7. Pp. 72–75. (rus)

7. Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Tarakanov O.V. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers ground together with cement or mineral rocks [Novye predstavleniya o mekhanizme deystviya superplastifikatorov, sovместно razmolytykh s tsementom ili mineralnymi porodami]. Construction materials. 2014. No. 9. Pp. 70–75. (rus)

8. Nesvetaev G.V., Korchagin I.V., Potapova Yu.I. On the influence of superplasticizers on the porosity of cement stone [O vliyaniy superplastifikatorov na poristost tsementnogo kamnya]. Scientific Review. 2014. No. 7. Pp. 837–841. (rus)

9. Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V. Some features of the mechanism of action of organomineral modifiers on cement systems [Nekotorye osobennosti mekhanizma deystviya organomineralnykh modifikatorov na tsementnye sistemy]. Seismic construction. Safety of structures. 2017. No. 1. Pp. 40–46. (rus)

10. Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev Sh.M., Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D. Features of hydration processes of binder compositions using waste expanded perlite sand [Osobennosti protsessov gidratatsii vyzhushchikh kompozitsiy s ispolzovaniem otkhodov vspuchennogo perlitovogo peska]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 75–88. (rus)

11. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials. Life Science Journal. 2014. Vol. 11. No. 12. Pp. 948–953.

12. Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S., Shamshurov A.V., Belikov D.A. Composite binders based on an organo-mineral modifier for dry repair mixtures [Kompozitsionnye vyzhushchie na osnove organo-mineralnogo modifikatora dlya sukhikh remontnykh smesey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova. 2014. No. 5. Pp. 25–31. (rus)

13. Plank J., Hirsch C. Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. Cement and Concrete Research. 2007. Vol. 37. No. 4. Pp. 537–542.

14. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.Kh., Belikov D.A., Shchekina A.Yu., Kuprina A.A. Effective dry mixtures for repair and restoration work [Effektivnye sukhie smesi dlya remontnykh i vosstanovitelnykh rabot]. Building materials. 2014. No. 7. Pp. 82–85. (rus)

15. Duguev S.B., Ivanova V.B. Mechanochemical activation in the production of dry building mixtures [Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya v proizvodstve sukhikh stroitelnykh smesey]. Construction materials. 2000. No. 5. Pp. 28–30. (rus)

16. Dudynov S.V. Biological additives for building materials [Biologicheskie dobavki dlya stroitelnykh materialov]. Innovations and investments. 2020. No. 4. Pp. 95–198. (rus)

17. Rusanov A.I. Micelle formation in solutions of surfactants [Mitselloobrazovanie v rastvorakh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv]. S.-Pb.: Chemistry. 1992. 280 p. (rus)

18. Skripkyunas G., Yakovlev G.I., Karpova E.A., Mohamed E.A.E.M. Change in the rheological properties of nanomodified cement systems [Izmenenie reologicheskikh svoystv nanomodifitsirovannykh tsementnykh sistem]. Industrial and Civil Construction. 2017. No. 2. Pp. 43–50. (rus)

19. Ilyina L.V., Samchenko S.V., Rakov M.A., Zorin D.A. Modeling the kinetics of cement composites modified with calcium-containing additives [Modelirovanie protsessov kinetiki tsementnykh kompozitov, modifitsirovannykh kaltsiy-soderzhashchimi dobavkami]. Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2023. Vol. 15. No. 5. Pp. 494–503. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503 (rus)

20. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. Pp. 816–819.

21. Batalin B.S., Gazetdinov D.R. Study of the influence of a protein foaming agent on the aggregative stability of Portland cement [Issledovanie vliyaniya belkovogo penoobrazovatelya na agregativnyuyu ustoychivost portlandtsementa]. Izvestia Vuzov. Construction. 2008. No. 6. Pp. 38–40. (rus)

22. Topchiy Yu.S., Khabirov D.M. Modified protein plasticizer for cement systems [Modifitsirovannyi belkovyy plastifikator dlya tsementnykh sistem]. Concrete Technologies. 2013. No. 11(88). Pp. 46–47. (rus)

23. Eliseev S.A., Kucher R.V. Surfactants and biotechnology [Poverkhnostno-aktivnye veshchestva i biotekhnologiya]. Kyiv: Naukova Dumka, 1991. 116 p. (rus)

24. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. Advanced Concrete Technology. 2003. No. 1. Pp. 5–15.

25. Song H., Pei Yu.V., Xiang M.K. Study on the compatibility of cement-superplasticizer system based on the amount of free solution. Technological Sciences. 2011. Vol. 54. No. 1. Pp. 183–189.

26. Morin V., Cohen F., Feylessouli A., Richard P. Superplasticizer effects on setting and structuration mechanisms of ultra high performance concrete. Cement and Concrete Research. 31. 2001. Pp. 63–71.

27. Zagorodnyuk L.Kh., Nasonova V.V., Sumskoy D.A., Makhortov D.S. Composite binder

using aluminosilicate fillers and organic additives of biological origin [Kompozitsionnoe vyazhushchee s ispolzovaniem alyumosilikatnykh napolniteley i or-

ganicheskikh dobavok biologicheskogo proiskhozhdeniya]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova. 2024. No. 6. Pp. 8–18 (rus)

Information about the authors

Makhortov, Denis S. PhD. E-mail: denis-mahortov1995@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Zagorodnyuk, Liliya K. DSc, Professor. E-mail: LHZ47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nasonova, Victoria V. PhD. E-mail: v.nasonova@fneps.ru. Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbатов RAS. Russia, 109316, Moscow, st. Talalikhina, 26.

Sumskoy, Dmitry A. PhD. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.06.2024

Для цитирования:

Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А. Механизм химического взаимодействия биологических добавок с компонентами композиционного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 23–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-23-32

For citation:

Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.Kh., Nasonova V.V., Sumskoy D.A. Mechanism of chemical interaction of organic additive of biological origin with components composite binder. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 23–32. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-23-32

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-33-41

*Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

*E-mail: kacem90@bk.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ РАМНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОВТОРНО СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Аннотация. В число главных причин, из-за которых происходит исчерпание прочности конструкций и их последующее разрушение, входит усталостная прочность, которая во многом зависит от величины нагрузок, их постоянства и степени повреждений. Усталостная прочность сварных конструкций связана с высотой катета сварных соединений, что обусловлено влиянием остаточных сварочных напряжений на их работу при вибрационных нагрузках. Рассматривая варианты усиления металлоконструкций, можно отметить, что это связано либо с их физическим износом, либо с дополнительными нагрузками на несущие элементы каркаса. При этом, усиление возможно с частичной разгрузкой конструкций, либо без разгрузки, если это позволяет запас прочности металлоконструкций. Усиление представляет собой комплекс мер по повышению несущей способности конструкций, обеспечению их дальнейшей надежной эксплуатации и способности соответствовать эксплуатационным требованиям. С экономической точки зрения такое усиление является более эффективным, поскольку обычно оно не прерывает процесс эксплуатации. Рассмотрены результаты моделирования работы рамных узлов строительных металлоконструкций под воздействием динамических нагрузок. При моделировании рассмотрены варианты уменьшения высоты катетов сварных угловых швов и влияние величины остаточных сварочных напряжений на работу узлов.

Ключевые слова: металлические конструкции, усиления, рамные узлы, надёжность, катет сварного шва, прочность.

Введение. В последнее время внимание общественности к проблемам безопасности строительных конструкций повысилось. Ряд катастроф на строительных объектах, произошедших как в Российской Федерации, так и за рубежом, дополнительно усилил значимость проблемы безопасности зданий и сооружений. Анализ причин аварии показал, что одной из причин их наступления явилось отсутствие количественной оценки безопасности зданий и сооружений, мерой которой служит надёжность объекта или уровень риска.

Требование равнопрочности элементов конструкций может привести к катастрофическому разрушению всей конструкции. Это было отмечено Я.Б. Фридманом в своей работе более двадцати лет назад [1–3], а также подтверждено В.Д. Райзером в своей монографии [4]. Существующие подходы к проектированию не способны обеспечить оценку надёжности конструкции и создание их с определенным уровнем надёжности, то есть безопасности. Поэтому следует утверждать, что основным принципом проектирования должно быть обеспечение безопасности зданий и сооружений.

Любая структура может быть рассмотрена как система, состоящая из элементов, связанных между собой, чья надёжность должна быть определена расчетом. При проектировании и расчете необходимо учитывать не только равнопрочность, но и надёжность каждого элемента в зависимости от его важности для обеспечения без-

опасности всей конструкции. Здания, спроектированные в соответствии с российскими стандартами расчетов, имеют гораздо более высокую вероятность отказа после 50-летней эксплуатации по сравнению с зданиями, созданными с учетом европейских норм [5–7].

При проектировании металлических строительных конструкций целесообразно использовать вероятностный метод для сравнения различных вариантов проекта и для оценки безопасности конструкций. Однако свойства стали могут изменяться в процессе эксплуатации из-за воздействия разнообразных нагрузок, окружающей среды и техногенных факторов, что вызывает сомнения в предположении о нормальном распределении предела текучести [8]. В мировой практике предел текучести рассматривается как случайная величина, которая может быть описана различными распределениями, такими как нормальное, логнормальное, урезанное нормальное, бета-распределение и экстремальное типа I. Уровни вероятностей, используемые для определения требований к надёжности конструкций, могут существенно различаться в зависимости от выбранного распределения. Поэтому результаты расчетов надёжности конструкций и их сравнительный анализ с использованием теории вероятностей и математической статистики могут вызывать сомнения и терять смысл из-за потенциальных различий в распределениях нагрузок.

Часто соединения металлических конструкций выполняют внахлестку с использованием угловых швов. При этом при расчете не учитывается ориентация шва относительно действующего усилия (фланговые и лобовые швы). Усилие считается равномерно распределенным вдоль шва, а также рассматривается возможность разрушения шва в случае условного среза по металлу шва или по границе сплавления.

Большинство металлических конструкций в строительстве являются сварными. Сварной шов при этом можно рассматривать как систему отдельных сварных швов определенной длины. Вероятностная модель оценки надежности сварных соединений при равномерном распределении усилий по шву была предложена в работах Решетова. методика не пригодна для оценки надежности сварного шва как части сварной конструкции в условиях реальной эксплуатации, то есть при рассмотрении конкретного объекта в конкретной ситуации [9–12].

Методы исследований. Для достижения поставленной цели было использовано моделирование с использованием программного обеспечения Ansys SOLID186.

Получены результаты в виде:

1. перемещения в модели;
2. эквивалентные напряжения в модели, согласно 4-ой теории прочности;
3. расчетная долговечность (количество циклов до разрушения при повторно статических нагружениях).
4. расчетная долговечность в сварных зонах деталей соединения.

На рис. 1 представлена модель конечных элементов и 3D-модели элемента Колонна-Балка. Для создания CAD-модели был использован программный пакет Ansys SpaceClaim.

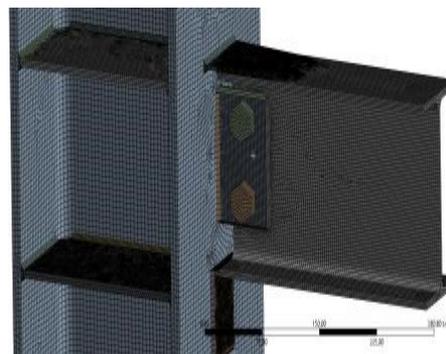


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Используя геометрические модели, были созданы конечные элементы с учетом срединных узлов. В модели также присутствуют гексаэдральные и тетраэдральные элементы, каждый из которых имеет размер 6 мм [13].

Необходимо проанализировать, какие значения нагрузок были применены в ходе процесса.

Для балок 18Б1х25К1 (по СТО АСЧМ), $N = 68646,55 \text{ Н}$.

На рисунке 2 изображены направление статической нагрузки и точки крепления.

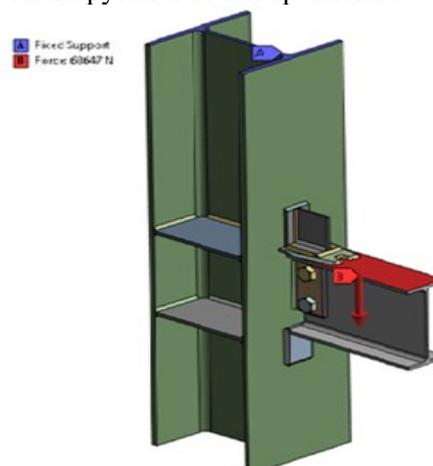


Рис. 2. Пределы условий (укрепление при помощи накладки, уголка и ребра)

Для расчетов применяется нелинейная модель материала, описание свойства материала представлено на рисунке 3.

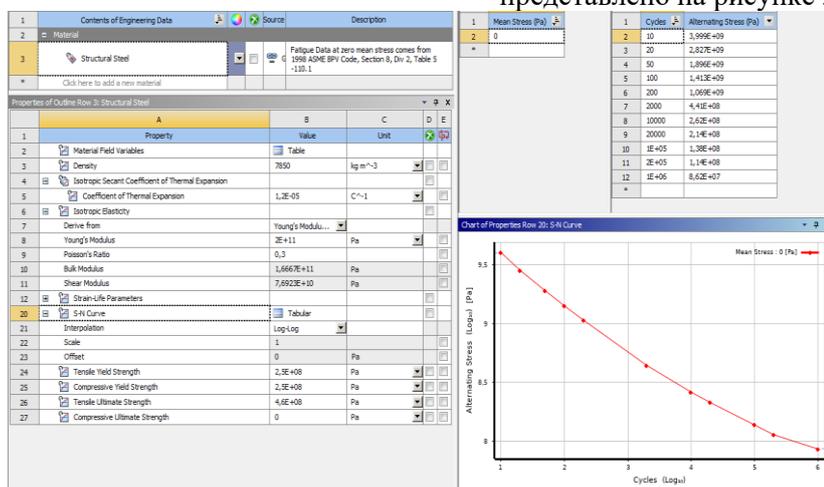


Рис. 3. Свойства материала

Результаты моделирования образцов сечением 18×25

1 – моделирования образцов до усиления с катетами 6 мм и 8 мм

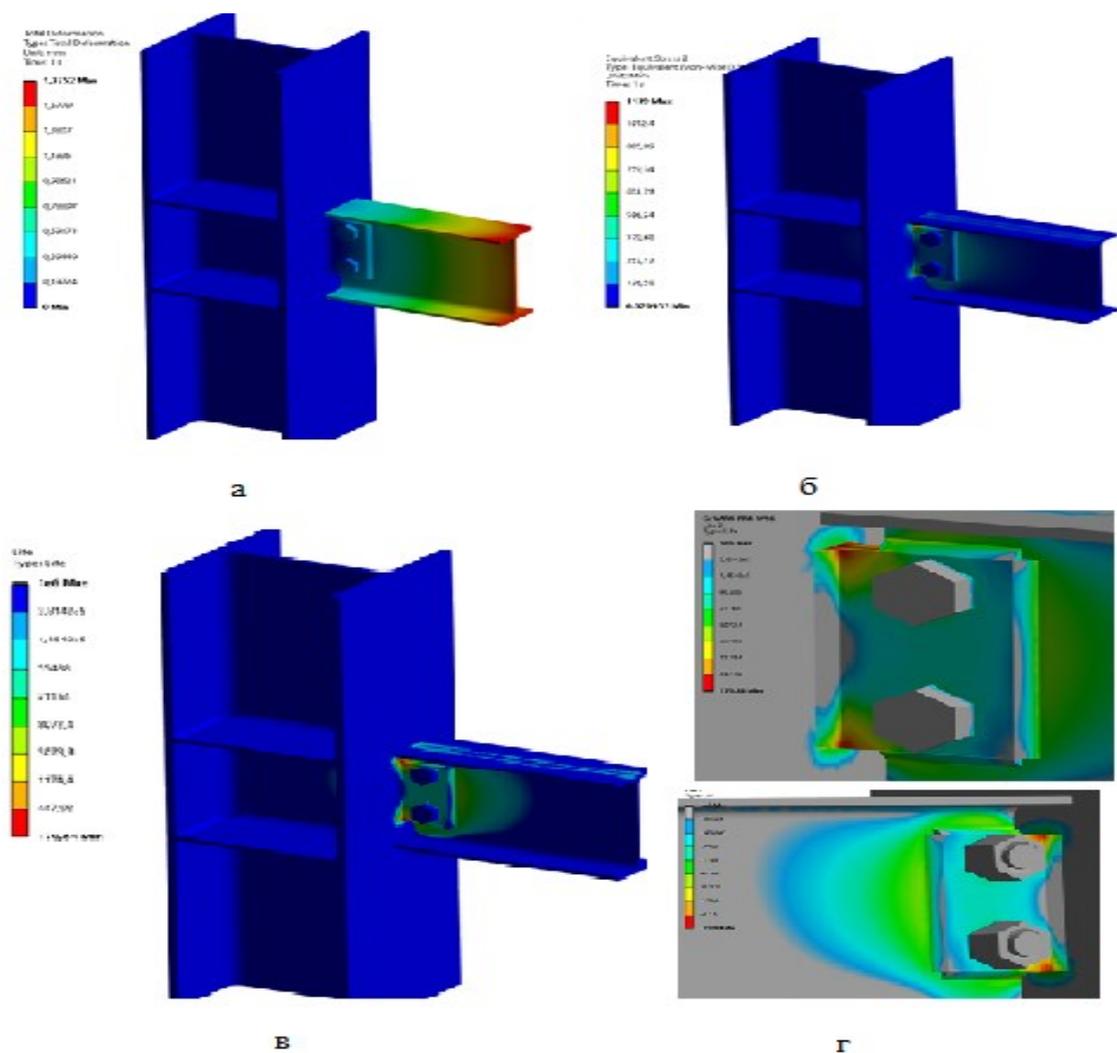


Рис. 4. Результаты моделирования образцов сечением 18×25 (катет шва 6 мм);

а – перемещения в модели, б – эквивалентные напряжения в модели, в – расчетная долговечность, г – расчетная долговечность в сварных зонах деталей соединения

В модели наблюдаются напряжения, превышающие предел текучести материала, указывая на излишне высокую нагрузку на соединение данной конструкции.

Наибольшие напряжения в сварных швах образуются там, где детали усиления соединены с вертикальной опорой. Самый низкий коэффициент безопасности в сварных швах верхних и нижних деталей усиления при заданном пределе текучести материала составляет 0,22. Если значение коэффициента меньше 1, то после нагрузки возникают пластические деформации, в других случаях деформации остаются упругими.

На рис. 4. представлены показатели для симметрично нагруженной балки, потребовалось всего 171 циклов до разрушения. Признаки усталостного повреждения заметны в областях соединения планок с деталью.

Напряжения в модели значительно превышают предел текучести материала, указывая на излишне высокую нагрузку для данной конструкции соединения.

Наибольшие напряжения в сварных швах возникают при соединении деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент безопасности в сварных швах верхней и нижней деталей усиления равен 0,22 при заданном пределе текучести материала. В случае, если коэффициент меньше 1, в этих местах после нагрузки происходят пластические деформации, в других местах – упругие.

На рис. 5. представлены показатели до разрушения, при симметричной нагрузке балки требуется всего 105 циклов. Признаки усталостного разрушения видны в зонах сварки планок с деталями.

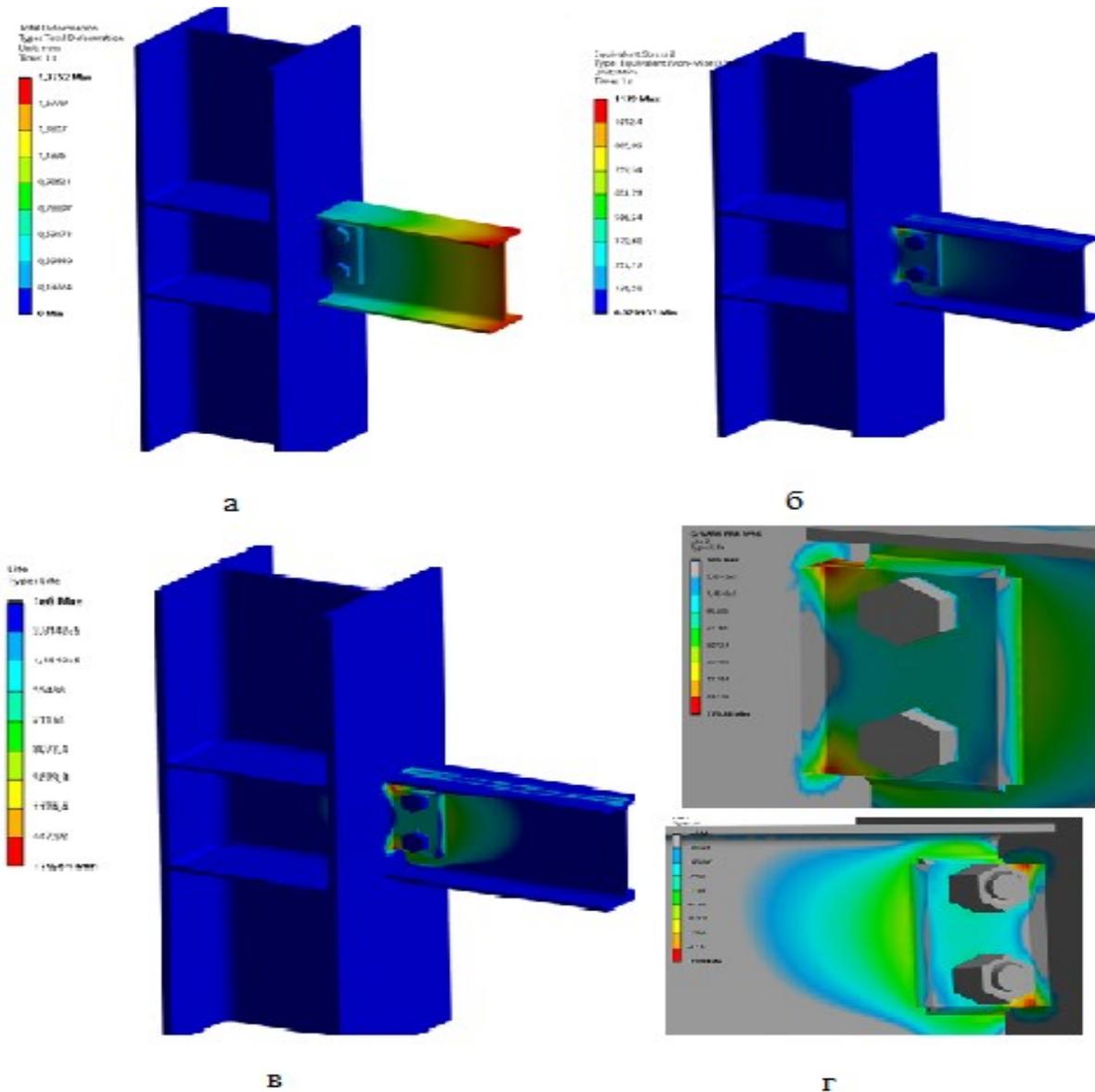


Рис. 5. Результаты моделирования образцов сечением 18×25 (катет шва 8 мм): а – перемещения в модели, б – эквивалентные напряжения в модели, в – расчетная долговечность, г – расчетная долговечность в сварных зонах деталей соединения

Таблица 1

Общий обзор результатов моделирования образцов до их улучшения

Вариант сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения	Общие перемещения, мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
18Б1х25 К1	68646,55	6	171	1,78	1139
		8	105	1,96	1689

2- моделирования образцов после усиления с катетами 6 мм и 8 мм (Усиления с помощью накладки, уголка и ребра)

Наибольшие напряжения в сварных швах возникают в точках соединения деталей с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент безопасности в сварных швах верхней и нижней деталей усиления при определенном пределе прочности материала составляет 0,91. В случае,

если коэффициент меньше 1, возникают пластические деформации после нагрузки, в остальных случаях деформации остаются упругими.

На рис. 6. представлены показатели для симметрично нагруженной балки, минимальное количество циклов до разрушения составляет 16545. Признаки усталостного разрушения присутствуют как в верхнем, так и в нижнем уголке усиления.

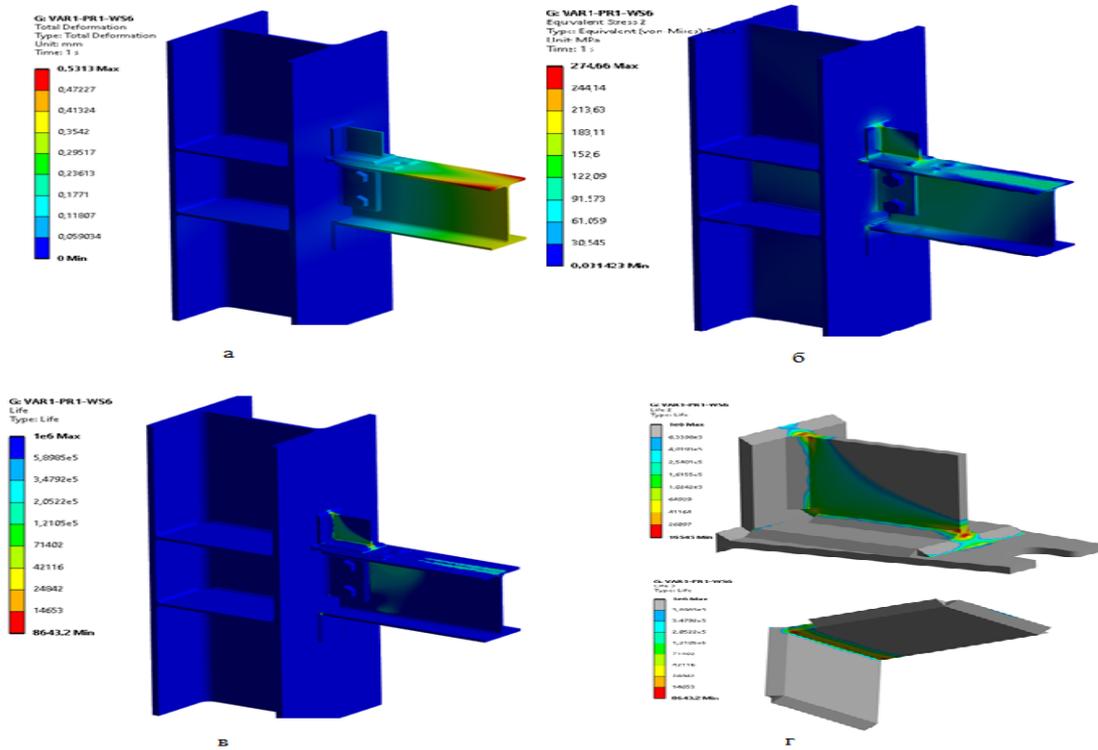


Рис. 6. Результаты моделирования образцов сечением 18×25 (катет шва 6 мм) после усиления: а – перемещения в модели, б – эквивалентные напряжения в модели, в – расчетная долговечность, г – расчетная долговечность в сварных зонах деталей соединения

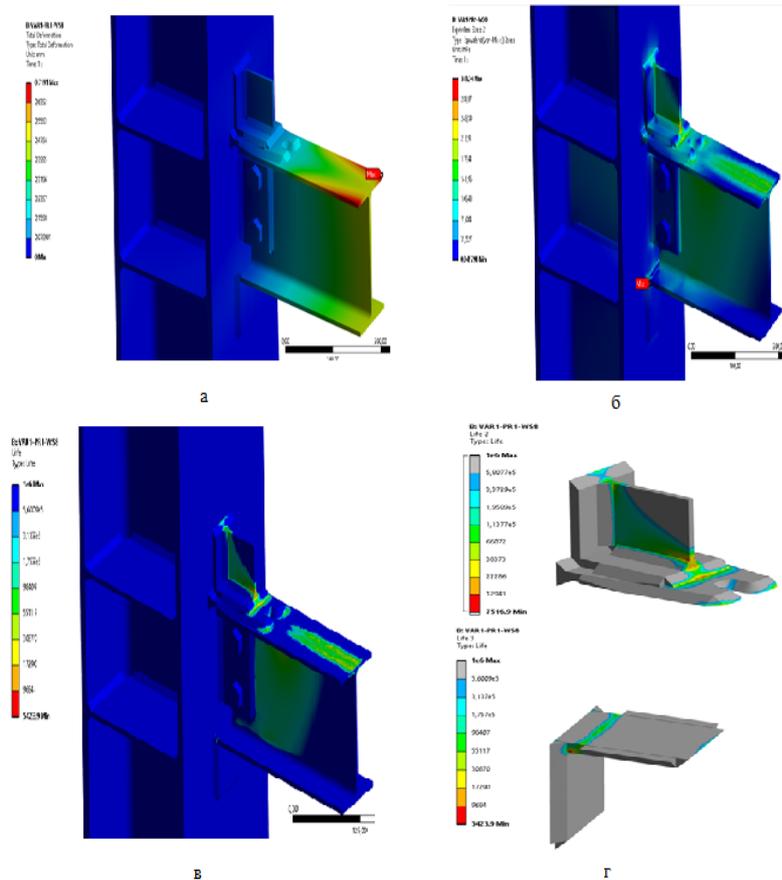


Рис. 7. Результаты моделирования образцов сечением 18×25 (катет шва 8 мм) после усиления: а – перемещения в модели, б – эквивалентные напряжения в модели, в – расчетная долговечность, г – расчетная долговечность в сварных зонах деталей соединения

Наибольшие напряжения в сварных швах возникают в точках соединения деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент запаса прочности в сварных швах верхней и нижней деталей усиления при установленном пределе текучести материала равен 0,78. В случае, если этот коэффициент меньше 1, возникают пластические деформации после нагрузки,

в противном случае деформации остаются упругими.

На рис. 7. представлены показатели до разрушения балки при симметричном нагружении, потребовалось всего 7517 цикла. Признаки усталостного разрушения отчетливо видны как в нижнем, так и в верхнем уголке усиления.

Таблица 2

Результаты анализа образцов после проведения моделирования усиления были обобщены

Вариант сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения	Общие перемещения, мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
18Б1х25 К1	68646,55	6	16545	0,53	274,66
		8	7517	0,72	319,34

Обсуждение. Из проведенных расчетов можно сделать следующие заключения.

Изделия с наименьшими размерами катетов сварных швов более устойчивы к разрушению и имеют более высокую циклическую прочность.

Предположительно, размеры катетов сварных швов и соответствующие им усиления имеют значительное воздействие на усталостную прочность узла.

Таблица 3

Общее изучение данных, полученных в результате моделирования образцов, проведено

Вариант сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения	Общие перемещения, мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
До усиления					
18Б1х25 К1	68646,55	6	171	1,78	1139
		8	105	1,96	1689
После усиления (усиления с помощью накладки, уголка и ребра)					
18Б1х25 К1	68646,55	6	16545	0,53	274,66
		8	7517	0,72	319,34

Выводы. Исходя из данных результатов, можно сделать предположение о том, что надежность рассматриваемого варианта усиления при динамических нагрузках работа сварного соединения в узле каркаса имеет большое значение. Исследования показали, что вибрационная прочность узла увеличивается на 40 % при уменьшении высоты катетов сварных швов на 33 %.

Из данного наблюдения можно сделать вывод, что уменьшение веса наплавленного металла в швах сварных соединений при проведении работ по усилению металлических конструкций способствует повышению их надежности и обеспечивает возможность получения оптимального проектного решения.

Можно рекомендовать, при проектировании усиления узлов металлоконструкций использовать размеры катетов сварных швов минимально допустимые по действующим нормам СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. В 2-х ч. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.
2. Уткин В.С., Плотникова В.С. Оценка надежности комбинированных сварных соединений // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 10. С. 41–46.
3. Аль-Сабаеи А.К. Усиление узлов опирания и сопряжения строительных металлоконструкции // V Международный студенческий строительный форум-2020. Сборник докладов. В 2-х томах. Том 1. Белгород, 2020. С. 23–30.
4. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: Изд-во АСВ, 1998. 304 с.
5. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1988. 580 с.
6. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э. Проблемы оценки надежности металлических конструкций // Сборник докладов VI Международ-

ной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. Том 1. Белгород, 2022. С. 9–14.

7. Ведеников Г.С., Беленя Е.И., Игнатъева В.С., Кудишин Ю.И., Пуховский А.Б., Уваров Б.Ю., Валь В.Н., Морачевский Т.Н., Стрелецкий Д.Н. Металлические конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов; 7-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1998. 760 с.

8. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Пер. с нем. О.О. Андреева. М.: Стройиздат, 1994. 288 с.

9. Погодин Д.А., Уткин В.С., Оценка остаточной несущей способности и надежности металлоконструкций кранов при ограниченной информации // Вузовская наука - региону: Материалы первой Общероссийской научно-технической конференции. ВоГТУ. Вологда, 2003. С. 357–360.

10. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. 455 с.

11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation // Welding International. 2004. № 18. Pp. 213–215.

12. Chen H., Wang Q., Zeng W., Liu G., Sun J., He L., Bui T.Q. Dynamic brittle crack propagation modeling using singular edge-based smoothed finite element method with local mesh rezoning // European Journal of Mechanics-A/Solids 2019. No. 76. Pp. 208–223.

13. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э. Расчет НДС рамных узлов строительных металлоконструкции при их усилении // Вестник БГТУ

им. В.Г. Шухова. 2024. № 4. С. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

14. Черкасов В.К., Плотникова О.С. Сварка стальных конструкций. Вологда, ВоГТУ, 2003. 130 с.

15. Уткин В.С., Плотникова О.С. Определение надежности сварных соединений фланговыми швами при статическом нагружении // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2006. № 10. С. 70–73.

16. Абакумов Р.Г., Аль-Сабаеи А.К. Оценка уровня надежности вариантов усиления строительных металлоконструкций с использованием математической модели вероятности их безотказной работы // Вестник БГТУа им. В.Г. Шухова. 2021. № 7. С. 44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-44-50

17. Колесников В.Д. Методы усиления металлических конструкций уменьшением расчетной длины сжатых элементов // Молодой ученый 2020. № 21 (311). С. 503–510.

18. Пшеничкина В.А., Глухов А.В., Глухова С.М. Моделирование вероятностных параметров нагрузок в задачах оценки безопасности и ресурса зданий и сооружений // Строитель Донбасса. 2019. № 2 С. 58–63.

19. Аль-Сабаеи А.К. Расчет многоциклового усталости рамных узлов // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» 2024. № 2. С. 306–321.

20. Горев В.В. Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций. Высшая школа, 2002. 206 с.

Информация об авторах

Аль-Сабаеи Арафат Касем, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kacem90@bk.ru. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Абсиметов Владимир Эскендерович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: absimetov57@mail.ru. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 06.06.2024 г.

© Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э., 2024

Al-Sabaei A.Q., Absimetov V.E.

Belgorod State Technological University, which bears the name of V.G. Shukhov

**E-mail: kacem90@bk.ru*

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF REINFORCING FRAME UNITS OF BUILDING METAL STRUCTURES UNDER REPEATED STATIC LOADS

Abstract. The main reasons for the exhaustion of structural strength and their subsequent destruction include fatigue strength, which largely depends on the magnitude of the loads, their constancy and the degree

of damage. The fatigue strength of welded structures is related to the height of the catheter of welded joints, which is due to the effects of residual welding stresses on their operation under vibration loads. Considering the options for strengthening metal structures, it can be noted that this is due either to their physical wear or to additional loads on the supporting elements of the frame. At the same time, reinforcement is possible with partial unloading of structures, or without unloading, if the safety margin of metal structures allows it. Reinforcement is a set of measures to increase the bearing capacity of structures, ensure their continued reliable operation and the ability to meet operational requirements. From an economic point of view, such reinforcement is more effective, since it usually does not interrupt the operation process. The results of modeling the operation of frame assemblies of building metal structures under the influence of dynamic loads are considered. When modeling, the considered options are reducing the height of the welded angle joints and the effect of residual welding stresses on the operation of the nodes.

Keywords: metal structures, reinforcements, frame assemblies, reliability, weld catheter, strength

REFERENCES

1. Forrest P. Fatigue of metals [Ustalost' metallov]. Moscow : Mashinostroenie, 1968. 354 p. (rus)
2. Utkin B.C., Plotnikova O.S. Reliability assessment of combined welded joints [Ocenka nadezhnosti kombinirovannyh svarnyh soedinenij]. Bulletin of Civil Engineers. 2007. No. 10. Pp. 41–46. (rus)
3. Al-Sabaei A.K. Reinforcement of support and coupling nodes of building metal structures [Usilenie uzlov opiraniya i sopryazheniya stroitel'nyh metallokonstrukcii]. V International Student Construction Forum 2020. Collection of reports. In 2 Vol. Vol 1. Belgorod, 2020. Pp. 23–30. (rus)
4. Reiser W.D. Reliability theory in construction design [Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii]: Monograph. V.D. Riser. M.: Publishing House ASV, 1998. 304 p. (rus)
5. Augusti G. Probabilistic methods in construction design [Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii]. Per. from English M.: Stroyizdat, 1988. 580 p. (rus)
6. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E. Problems of assessing the reliability of metal structures [Problemy ocenki nadezhnosti metallicheskih konstrukcij]. Collection of reports of the VI International Scientific and practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Construction and Urban Management. Vol 1. Belgorod, 2022. Pp. 9–14. (rus)
7. Vedenikov G.S., Belenya E.I., Ignatieva V.S., Kudishin Yu.I., Pukhovskiy A.B., Uvarov B.Yu., Val V.N., Morachevskiy T.N., Streletskiy D.N. Metal structures [Metallicheskie konstrukcii]: General course: Proc. for universities - 7th ed. reworked and additional. M.: Stroyizdat, 1998. 760 p. (rus)
8. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures [Nadezhnost' nesushchih stroitel'nyh konstrukcij]. Transl. with a german. O.O. Andreeva. M.: Stroyizdat, 1994. 288 p. (rus)
9. Pogodin D.A., Utkin B.S. Assessment of the residual load-bearing capacity and reliability of metal structures of cranes with limited information [ocenka ostatochnoj nesushchej sposobnosti i nadezhnosti metallokonstrukcij kranov pri ograničennoj informacii]. University science - to the region: Materials of the first All-Russian scientific technical conference. VoSTU. Vologda: 2003. Pp. 357–360. (rus)
10. Pichugin S.F. Reliability of steel structures of industrial buildings [Nadezhnost' stal'nyh konstrukcij proizvodstvennyh zdaniy]. M.: Publishing house of the Association of Construction Universities, 2011. 455 p. (rus)
11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004. No. 18. Pp. 213–215.
12. Chen H., Wang Q., Zeng W., Liu G., Sun J., He L., Bui T.Q. Dynamic brittle crack propagation modeling using singular edge-based smoothed finite element method with local mesh rezoning. European Journal of Mechanics-A/Solids. 2019. No. 76. Pp. 208–223.
13. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E. Calculation of (SSS) of frame units of building metal structures when strengthening them. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35 (rus)
14. Cherkasov V.K., Plotnikova O.S. Welding of steel structures [svarka stal'nyh konstrukcij]. Vologda, VoSTU, 2003. 130 p. (rus)
15. Utkin B.C., Plotnikova O.S. Determination of the reliability of welded joints with flank seams under static loading [Opredelenie nadezhnosti svarnyh soedinenij flangovymi shvami pri staticheskom nagruženii]. Construction materials, equipment and technologies of the XXI century. 2006. No. 10. Pp. 70–73. (rus)
16. Abakumov R.G., Al-Sabaei A.K., Assessment of the reliability level of reinforcement options for building metal structures using a mathematical model of the probability of their trouble-free operation [Ocenka urovnya nadezhnosti variantov usileniya stroitel'nyh metallokonstrukcij s ispol'zovaniem matematicheskoj modeli veroyatnosti ih bezotkaznoj raboty]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp.

44–50. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-44-50 (rus)

17. Kolesnikov V.D. Methods of strengthening metal structures by reducing the calculated length of compressed elements [Metody usileniya metallicheskikh konstrukcij umen'sheniem raschetnoj dliny szhatyh elementov]. Young scientist. 2020. No. 21 (311). Pp. 503–510. (rus)

18. Pshenichkina V.A. Pshenichkina V.A., Glukhov A.V., Glukhova S.G. Modeling of probabilistic parameters of loads in the problems of assessing the safety and resource of buildings and structures [Modelirovanie veroyatnostnyh parametrov nagruzok v

zadachah ocenki bezopasnosti i resursa zdaniy i sooruzhenij]. 2019. No.2. Pp. 58–63. (rus)

19. Al-Sabaei, A.K., Calculation of multicycle fatigue of frame assemblies [Raschet mnogociklovoj ustalosti ramnyh uzlov]. Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don» 2024. No. 2. Pp. 306–321. (rus)

20. Gorev V.V. Mathematical modeling in calculations and studies of building structures [Matematicheskoe modelirovanie pri raschetah i issledovaniyah stroitel'nyh konstrukcij]: Higher School, 2002. 206 p. (rus)

Information about the authors

Al-sabaei, Arafat Q. Assistant. E-mail: kacem90@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Absimetov, Vladimir E. DSc, Professor. E-mail: absimetov57@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 06.06.2024

Для цитирования:

Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э. Оценка надёжности усиления рамных узлов строительных металлоконструкций при повторно статических нагружениях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 33–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-33-41

For citation:

Al-Sabaei A.Q, Absimetov V.E. Assessment of the reliability of reinforcing frame units of building metal structures under repeated static loads. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 33–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-33-41

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-42-55

^{1,2}Римшин В.И., ^{3,*}Амелин П.А., ³Сулейманова Л.А.¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет²Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: p.amelin@inbox.ru

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Статья посвящена исследованию силового сопротивления железобетонных изгибаемых элементов на различных стадиях их жизненного цикла с учетом коррозионного повреждения арматуры и последующего композитного усиления. В работе рассмотрены изменения характеристик железобетонных конструкций под воздействием эксплуатационных и агрессивных факторов окружающей среды, что приводит к снижению их несущей способности. Основное внимание уделено коррозии арматурной стали, которая вызывает растрескивание бетонного покрытия и уменьшение сечения арматуры, снижая долговечность конструкции. Для прогнозирования остаточной прочности и несущей способности железобетонных элементов предложен подход, основанный на применении искусственных нейронных сетей. Прогнозирование осуществлялось с использованием искусственных нейронных сетей в программном комплексе Statistica. Разработаны и протестированы модели многослойного перцептрона с использованием данных об испытаниях железобетонных балок с различными повреждениями и усилениями. Модели искусственных нейронных сетей были валидированы с использованием кросс-валидации и показали высокую устойчивость к изменению входных данных, что подтверждает их пригодность для практического применения в гражданском строительстве для оценки остаточной несущей способности. Применение искусственных нейронных сетей позволяет учитывать нелинейные зависимости между параметрами и улучшает прогнозируемые результаты, что делает их более надежным инструментом по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозия арматуры, искусственные нейронные сети, прогнозирование прочности, многослойный перцептрон, композитное усиление, моделирование жизненного цикла

Введение. Силовое сопротивление железобетонных элементов изменяется на протяжении всего жизненного цикла объекта капитального строительства в зависимости от возраста материалов, уровней и режимов нагружения, а также сопутствующих характеристик окружающей среды [1–3].

На этапе проектирования конструкций в качестве исходных данных расчета закладываются идеализированные характеристики материалов, в результате чего фактическое силовое сопротивление изготовленной на заводе конструкции несколько отличается от проектного. В российских строительных правилах расчет конструкций производится по методу предельных состояний, несоответствие силового сопротивления в железобетоне решается посредством учета коэффициентов надежности и условий работы, увеличивающих закладываемые значения нагрузок и уменьшающие механические характеристики материалов.

С первого дня эксплуатации объекта капитального строительства его конструкции подвергаются воздействию как силовых, так и

агрессивных несилевых нагрузок, что приводит к развитию коррозионных процессов в бетоне и арматуре, уменьшая силовое сопротивление и вызывая преждевременное наступление предельных состояний в конструкции [4].

Коррозия арматурных стальных стержней (арматуры) в железобетонных конструкциях является основной причиной снижения долговечности конструкции. Когда карбонизация или концентрация хлорид-ионов на поверхности стали достигают критического значения, оксидная пленка может депассивироваться и начать коррозию [5–8]. Хорошо известно, что продукты коррозии, образующиеся на границе раздела бетон-сталь, могут привести к объемному расширению и, в конечном итоге, к растрескиванию бетонного покрытия. Коррозия также может вызывать уменьшение площади поперечного сечения арматуры и существенно влиять на ее механические свойства, в том числе на предел текучести, предел прочности и пластичность, что значительно уменьшает остаточный срок службы железобетонных изгибаемых элементов [9, 10].

Коррозия арматуры в большей степени изменяет геометрические характеристики

арматуры, нежели физико-механические характеристики стали. Расчетная площадь поперечного сечения поврежденной стальной арматуры представляется как [11]:

$$A_s^* = A_s - A_s^{cor}, \quad (1)$$

где A_s – площадь поперечного сечения стальной арматуры до коррозии; A_s^{cor} – расчетная площадь коррозионных повреждений поперечного сечения стальной арматуры.

С целью увеличения срока эксплуатации и силового сопротивления поврежденных железобетонных элементов современным решением является использование композитных материалов на основе стекло- и углепластиков при проведении ремонтно-восстановительных работ. Данные композитные материалы имеют высокие показатели прочности на растяжение, малый вес и высокую степень коррозионной стойкости. При включении элементов усиления в работу их волокна воспринимают силовое воздействие, а матрица перераспределяет нагрузку между волокнами и предохраняет от агрессивного воздействия окружающей среды [12–15].

Существует большое количество научных исследований, основанных на эмпирическом методе прогнозирования несущей способности усиленных железобетонных элементов, которые однако не имеют универсальной применимости, что противоречит получению более обобщенного решения. Тем не менее, проводятся исследования по прогнозированию параметров остаточной прочности с использованием методов мягких вычислений (искусственных нейронных сетей (ИНС), генетических алгоритмов, нечеткой логики, метода опорных векторов и т. д.), которые показали существенное улучшение прогнозируемого результата и оказались более надежным подходом.

Предполагается, что с учетом огромного количества данных, полученных в результате различных экспериментов на протяжении многих лет, надежные методы интеллектуального анализа данных, основанные на парадигмах вычислительного интеллекта и машинного обучения, способны преодолеть ограничения традиционных методов [16]. ИНС – это хорошо зарекомендовавшие себя технологии, которые применяются в самых разных приложениях, от распознавания образов до оптимизации. Одной из привлекательных особенностей ИНС является их способность выполнять нелинейные многомерные интерполяции. Эта особенность ИНС позволяет улавливать существующие нелинейные зависимости между входными и выходными параметрами. ИНС является

наиболее часто используемым методом в различных областях инженерных наук [17].

В настоящее время существуют исследования, в которых используются ИНС в качестве эффективного метода, обеспечивающего ее применимость в гражданском строительстве. В работе [18] представлена модель нейронной сети, которая прогнозирует работоспособность бетона с материалами, заменяющими цемент. Результаты их модели нейронной сети показали высокую сходимость с экспериментальными результатами и продемонстрировали высокую эффективность данного метода. В работах Римшина В.И. [19, 20] изучено применение искусственного интеллекта при обследовании зданий и сооружений для обнаружения существующих дефектов конструкций и дальнейшего их композитного усиления. В работе [21] исследовано применение ИНС для прогнозирования предельного несущего момента железобетонных плит при пожаре. Модель ИНС была построена, обучена и протестирована с использованием 294 наборов данных для плит, подвергшихся воздействию огня. Показано, что модель ИНС с высокой степенью точности предсказывает предельную нагрузку момента железобетонных плит при пожаре в рассматриваемом диапазоне входных параметров.

ИНС достаточно широко применяются при моделировании многих проблем гражданского строительства, однако нет исследований относительно прогнозирования несущей способности железобетонных элементов на различных стадиях жизненного цикла, включающих коррозионное повреждение стальной арматуры изгибаемых элементов с их последующим композитным усилением, что является предметом данного исследования.

Методы. Искусственные нейронные сети обычно представляются как системы тесно взаимосвязанных «нейронов», которые могут вычислять значения на основе входных данных [22]. Для создания нейронной сети использован программный продукт STATISTICA Neural Networks (SNN), разработанный компанией StatSoft.

Для разработки моделей ИНС была реализована последовательность следующих этапов:

1. Сбор данных о несущей способности железобетонных элементов: на данном этапе был собран и систематизирован массив данных, отражающих значения независимых переменных железобетонных изгибаемых элементов. Эти данные являются важными переменными, влияющими на изгибающий момент и

разрушающую нагрузку и должны учитываться при разработке модели нейронной сети.

2. Создание и подготовка базы данных: Следующим шагом была запись и подготовка обширной базы данных, включающей все собранные экспериментальные и расчетные данные. База данных была структурирована таким образом, чтобы обеспечить удобный доступ к информации и ее эффективное использование в процессе обучения нейронной сети. Подготовка данных включала их нормализацию и предварительную обработку для устранения возможных аномалий и ошибок измерений.

3. Разработка, обучение и тестирование моделей нейронных сетей: после подготовки данных была осуществлена разработка нескольких архитектур моделей нейронных сетей. Каждая из моделей была обучена на подготовленном наборе данных. Обучение включало многократную настройку параметров модели и корректировку весов связей между нейронами для минимизации ошибки прогнозирования. Кроме того, были проведены тестовые испытания моделей для оценки их точности и производительности на независимых наборах данных.

4. Анализ результатов и выбор оптимальной модели: на этапе анализа результатов оценивалась эффективность каждой из разработанных моделей. Основными критериями выбора оптимальной модели были минимальная ошибка прогнозирования, высокая точность и способность модели к обобщению. Анализ результатов позволил выбрать наиболее эффективную структуру нейронной сети, которая лучше всего справляется с задачей прогнозирования тепловых потерь.

5. Определение изгибающего момента и разрушающей нагрузки: на заключительном этапе с использованием выбранной модели нейронной сети были выполнены расчеты изгибающего момента и разрушающей нагрузки рассматриваемых изгибаемых элементов. Модель позволила определить величину изгибающего момента и разрушающей нагрузки с учетом всех собранных расчетных и экспериментальных данных.

База данных, используемая для обучения, была разделена на три группы (рис. 1, а):

Обучающая группа: 70 % всех данных было выделено для обучения модели. Этот набор данных использовался для корректировки параметров и весов модели, чтобы она могла точно прогнозировать на основе входных данных. Данные в этой группе были случайным образом выбраны из общей базы.

Тестовая группа: 15 % данных от общего объема использовались для тестирования модели. Этот набор данных был применен для оценки качества обучения и выявления возможных проблем в моделировании. Тестовая группа данных позволяла проверить, как модель ведет себя на данных, которые не были использованы в процессе обучения.

Группа валидации: последние 15 % данных были выделены для этапа валидации. Эта группа использовалась для оценки способности модели к обобщению и ее производительности на данных, которые ранее не использовались ни для обучения, ни для тестирования. Этап валидации был необходим для определения того, насколько хорошо модель будет справляться с реальными данными, отличающимися от обучающих.

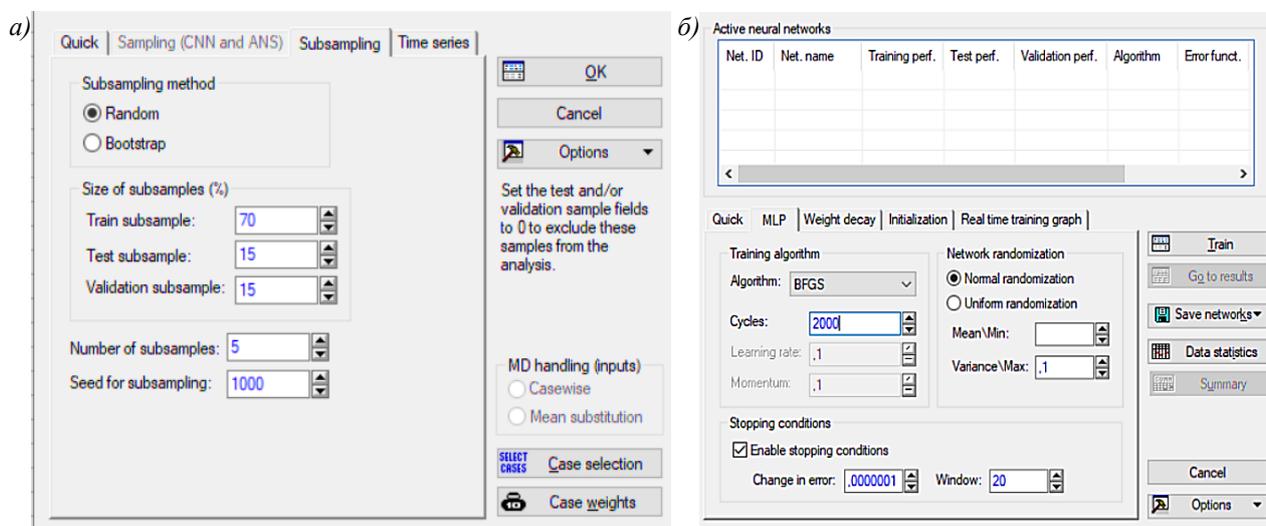


Рис. 1. Настройка параметров обучения модели ИНС: а – настройка количества нейронных сетей при обучении; б – настройка количества циклов обучения

Общий процесс обучения нейронной сети включал 2000 циклов (эпох) построения, как указано на рис. 1, б. Это означало, что модель проходила процесс обучения 2000 раз, каждый раз обновляя свои параметры и веса для улучшения качества прогнозирования.

Выходные данные после каждого этапа подвыборки представляли собой уменьшенные массивы данных, которые обрабатывались для повышения качества модели. На каждом шаге обучения данные проходили через слой подвыборки, где они фильтровались и уменьшались в размере перед передачей в следующий этап, что позволяло повысить точность и производительность модели.

Многослойный перцептрон (MLP) был выбран в качестве основной архитектуры ИНС из-за его способности эффективно решать задачи нелинейного многомерного прогнозирования. MLP обладает рядом преимуществ:

Способность к нелинейной интерполяции: MLP может моделировать сложные нелинейные зависимости между входными данными (например, прочность бетона, параметры арматуры, степень коррозии) и выходными данными (изгибающий момент, разрушающая нагрузка).

Гибкость в настройке параметров: В процессе обучения нейронной сети можно настроить количество слоев, количество нейронов в каждом слое и типы функций активации, что позволяет адаптировать модель к конкретной задаче.

Высокая точность прогнозирования: При правильной настройке MLP демонстрирует высокую точность прогнозов, что подтверждается низкими значениями средней абсолютной ошибки (MAE) и высоким соответствием прогнозируемых значений экспериментальным данным.

Способность к обучению на больших данных: MLP может эффективно обучаться на больших массивах данных, что особенно важно при наличии значительного объема экспериментальных данных для различных стадий жизненного цикла железобетонных элементов.

Процесс обучения был многократно повторен для получения оптимальной модели, наиболее точно отражающей зависимость между входными переменными и ожидаемыми результатами. В ходе каждой итерации обучения параметры модели корректировались для минимизации ошибки прогноза. Этот процесс продолжался до тех пор, пока не была достигнута заданная точность или не была найдена модель с наилучшей производительностью.

Для оценки качества полученных моделей был проведен статистический анализ выходных данных. Основным показателем для оценки точности прогнозирования выступала средняя абсолютная ошибка (MAE), которая измеряет среднее абсолютное отклонение прогнозируемых значений от фактических данных. Сравнение значений MAE для различных моделей позволило определить наиболее точную и надежную модель для дальнейшего использования в прогнозировании.

При построении сети испробован набор функций активации нейронов (линейная, логарифмическо-сигмоидная и т.д.). Функция ошибок SOS (Sum Of Squares) минимизирует среднеквадратическую ошибку полученной нейронной сети и вычисляется по формуле:

$$E(w_{ij}) = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (2)$$

где y_i – выходное значение i -го нейрона выходного слоя; \hat{y}_i – требуемое значение i -го нейрона выходного слоя.

Из полученного набора ИНС пакет SNN предлагает пользователю самостоятельно выбрать сеть с наилучшими параметрами. Критерием отбора является показатель наименьшей ошибки обучения контрольной партии при одновременном учете соответствующих ошибок обучения тестовой и обучающей партий. Затем анализ полученных и прогнозных значений разрушающей нагрузки проводится графически и при помощи вычисления величины относительной погрешности. Получение удовлетворительных результатов является завершающим этапом создания нейросетевой моде.

Анализ данных по общей чувствительности инструментами программы выявляет независимые переменные, имеющие наибольшее влияние на расчетное значение разрушающей нагрузки F_{ult} и разрушающего момента M_{ult} . Отсутствие линейной зависимости между независимыми переменными подтверждают с помощью матрицы с парными коэффициентами корреляции. Визуальный анализ поверхности, построенной в STATISTICA для этих переменных, определяет набор регрессий, на основе которых будет выполнен подбор формулы для инженерных расчетов.

Основная часть. В данном исследовании для разработки ИНС были использованы данные, полученные в ходе ряда научных работ, направленных на изучение различных аспектов изменения несущей способности железобетонных конструкций. В частности, анализировались долговременные характеристики и прочность железобетонных

балок, поврежденных коррозией, а также влияние коррозии арматуры на гибкость и несущую способность конструкций [23–27]. Для повышения точности моделей ИНС учитывались результаты испытаний, которые включали в себя данные о поведении балок с различной степенью коррозионных повреждений и их восстановлении с использованием различных композитных материалов [28–32].

Кроме того, исследование охватило методы прогнозирования остаточной прочности железобетонных элементов, поврежденных коррозией. В этом контексте особое внимание уделялось изучению влияния хлорид-индуцированной коррозии на прочностные характеристики арматуры и остаточную несущую способность конструкций [33–36].

Анализ экспериментальных данных позволил разработать и проверить модели ИНС, способные точно прогнозировать изменения несущей способности с учетом различных условий эксплуатации и типов коррозионных повреждений.

Дополнительно, в исследовании рассматривались методы усиления железобетонных элементов с использованием композитных материалов, таких как углеволокно и полимерные композиты [37–40], что обеспечивало повышение их долговечности и устойчивости к нагрузкам [41–43]. Это позволило создать более точные нейросетевые модели, способные учитывать сложные нелинейные зависимости между множеством параметров.

Таблица 1

Результаты обучения нейронных сетей

№ п/п	Для прогнозирования M_{ult}				Для прогнозирования F_{ult}			
	Имя	Эффективность			Имя	Эффективность		
		тренировки	теста	валидации		тренировки	теста	валидации
1	MLP 284-30-10	0,999922	0,995913	0,988006	MLP 284-30-10	0,999838	0,996627	0,991081
2	MLP 284-30-10	0,999594	0,992118	0,989673	MLP 284-30-10	0,999954	0,995162	0,973873
3	MLP 284-30-10	0,999795	0,992909	0,992310	MLP 284-30-10	0,999092	0,988775	0,989723
4	MLP 284-30-10	0,999873	0,971586	0,974042	MLP 284-30-10	0,999848	0,979741	0,977229
5	MLP 284-30-10	0,999880	0,993680	0,996994	MLP 284-30-10	0,999882	0,993392	0,995320
6	MLP 284-25-10	0,999722	0,995287	0,990161	MLP 284-25-10	0,999782	0,995322	0,987784
7	MLP 284-25-10	0,999784	0,993678	0,989060	MLP 284-25-10	0,999716	0,993658	0,983077
8	MLP 284-25-10	0,999766	0,994148	0,993420	MLP 284-25-10	0,999650	0,991696	0,992685
9	MLP 284-25-10	0,999479	0,979182	0,984282	MLP 284-25-10	0,999279	0,970103	0,976101
10	MLP 284-25-10	0,999906	0,991932	0,995543	MLP 284-25-10	0,998589	0,989274	0,992692
11	MLP 284-20-10	0,999798	0,995500	0,988056	MLP 284-20-10	0,999536	0,993931	0,976836
12	MLP 284-20-10	0,999561	0,990958	0,982348	MLP 284-20-10	0,999723	0,994022	0,978554
13	MLP 284-20-10	0,999716	0,991941	0,992881	MLP 284-20-10	0,999315	0,994574	0,991685
14	MLP 284-20-10	0,999752	0,980177	0,986914	MLP 284-20-10	0,999301	0,981245	0,989627
15	MLP 284-20-10	0,999264	0,991829	0,995232	MLP 284-20-10	0,999644	0,992466	0,993724
16	MLP 284-15-10	0,998628	0,991551	0,980449	MLP 284-15-10	0,994385	0,985153	0,977751
17	MLP 284-15-10	0,999508	0,993384	0,980368	MLP 284-15-10	0,997166	0,987935	0,973077
18	MLP 284-15-10	0,999388	0,992349	0,993328	MLP 284-15-10	0,997357	0,990536	0,988127
19	MLP 284-15-10	0,995630	0,958286	0,954502	MLP 284-15-10	0,990113	0,965424	0,972163
20	MLP 284-15-10	0,999170	0,992453	0,994698	MLP 284-15-10	0,996987	0,987856	0,992558
21	MLP 284-10-10	0,986399	0,978637	0,965899	MLP 284-10-10	0,983183	0,977061	0,953678
22	MLP 284-10-10	0,997963	0,978623	0,966952	MLP 284-10-10	0,968846	0,952406	0,939923
23	MLP 284-10-10	0,977392	0,953614	0,966238	MLP 284-10-10	0,991981	0,978865	0,977706
24	MLP 284-10-10	0,963163	0,933696	0,947541	MLP 284-10-10	0,973996	0,940773	0,955331
25	MLP 284-10-10	0,998501	0,985240	0,989080	MLP 284-10-10	0,961710	0,951492	0,954032
26	MLP 284-5-10	0,873070	0,858881	0,863841	MLP 284-5-10	0,878781	0,862156	0,858238
27	MLP 284-5-10	0,865545	0,855580	0,820574	MLP 284-5-10	0,849257	0,818935	0,809539
28	MLP 284-5-10	0,815058	0,825742	0,792471	MLP 284-5-10	0,857492	0,844351	0,830335
29	MLP 284-5-10	0,840748	0,790865	0,837632	MLP 284-5-10	0,835337	0,815911	0,835298
30	MLP 284-5-10	0,853030	0,857495	0,857817	MLP 284-5-10	0,866444	0,855859	0,870861

Для прогнозирования несущей способности железобетонных изгибаемых элементов применено математическое моделирование искусственными нейронными сетями (ИНС). Входной слой созданной ИНС состоит из независимых переменных – призмной прочности бетона R_b (МПа), ширины поперечного сечения b (мм), высоты поперечного сечения h (мм), предела текучести стальной арматуры растянутой зоны R_s (МПа), коэффициента стального армирования μ_s (%), снижения площади поперечного сечения арматуры вследствие коррозии ΔA_s , прочности полимеркомпозитного холста R_f (МПа), коэффициента полимеркомпозитного

армирования μ_f (%), расстояния от опоры до места приложения сосредоточенной силы l (мм). Выходной слой включает зависимые переменные – значения изгибающего момента M_{ult} (кН·м) и разрушающей нагрузки F_{ult} кН. Количество испытаний должно превышать число независимых переменных более чем в 4–5 раз для обеспечения их статистической значимости

Для обучения нейронной сети применялся метод многократных подвыборок (cross-validation), архитектуру нейронной сети в виде многослойного персептрона (MLP), использующего от 5 до 30 нейронов на внутреннем слое сети (см. табл. 1), как представлено на рис. 2.

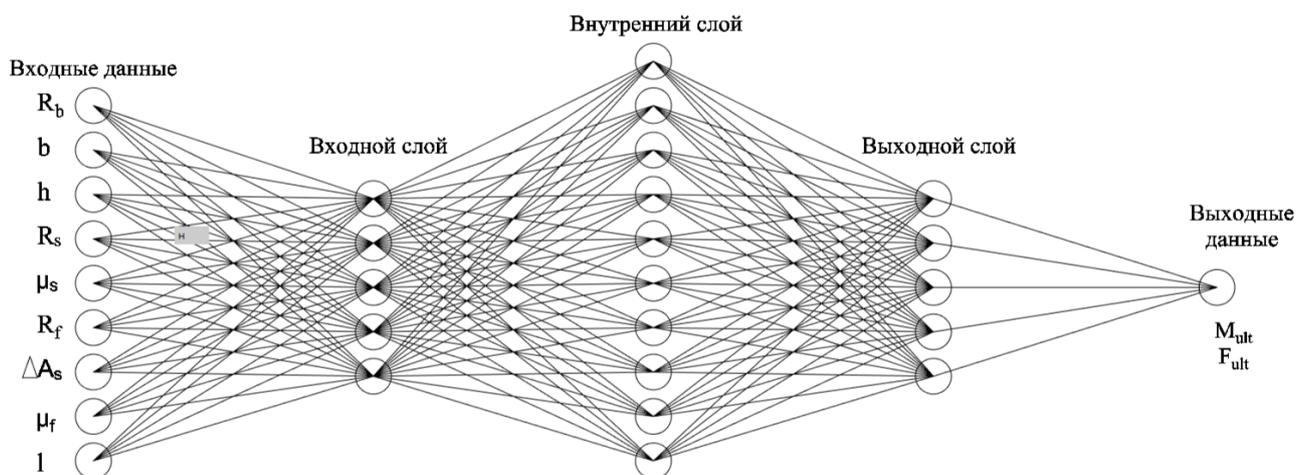


Рис. 2. Архитектура одной из созданных нейронных сетей (с 10 нейронами на внутреннем слое сети)

При анализе ошибок и производительности сетей на различных выборках (табл. 1) можно сделать вывод, что для набора обучающих данных, собранных на основании расчетных и экспериментальных исследований, наиболее подходящей является: для данных о изгибающем моменте – нейронная сеть 5, имеющая 30 нейронов на внутреннем слое, с высокими показателями эффективности как на этапе обучения (0,999880), так и на этапе тестирования (0,993680) и валидации (0,996994); для данных о разрушающей нагрузке – нейронная сеть 5, также имеющая 30 нейронов на внутреннем слое, с показателями эффективности как на этапе обучения (0,999882), так и на этапе тестирования (0,993392) и валидации (0,995320), что свидетельствует об их высокой точности и надежности.

Выбор данной сети обоснован тем, что ее прогнозы демонстрируют высокую степень соответствия фактическим значениям. Это подтверждается графиком прогнозов временных рядов для сети (рис. 3), на котором представлены

данные для тренировочной, тестовой и валидационной выборок.

Кроме того, гистограмма остатков (рис. 4) указывает на соответствие распределения ошибок нормальному закону распределения Гаусса-Лапласа. Это подтверждается наличием пика в центре гистограммы и относительно симметричными боковыми сторонами, что свидетельствует о сбалансированности предсказаний и отсутствии значимых систематических ошибок.

Дополнительно, точность модели подтверждается плотным распределением точек вдоль прямой линии на графике сравнения фактических и прогнозируемых значений (рис. 5).

Высокая концентрация точек около прямой линии указывает на то, что фактические значения практически совпадают с прогнозируемыми, что свидетельствует о минимальных отклонениях.

Полученные регрессионные модели допускают среднюю абсолютную ошибку (MAE) для набора данных изгибающего момента – 0,74 %; для разрушающей нагрузки – 0,84 %.

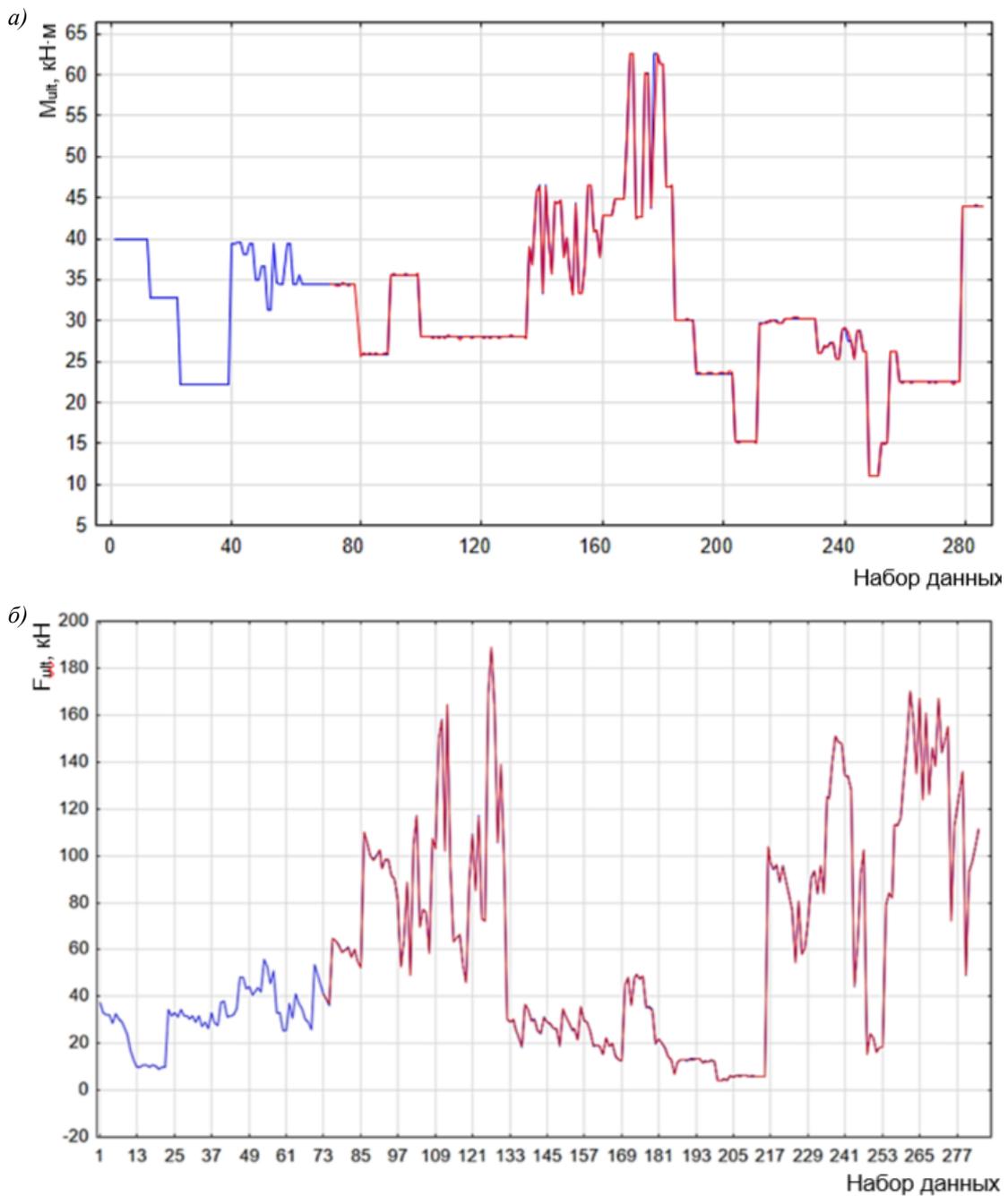


Рис. 3. График прогнозов временных рядов для сети с использованием тренировочной, тестовой и валидационной выборок:
a – для набора данных изгибающего момента; *б* – для набора данных разрушающей нагрузки

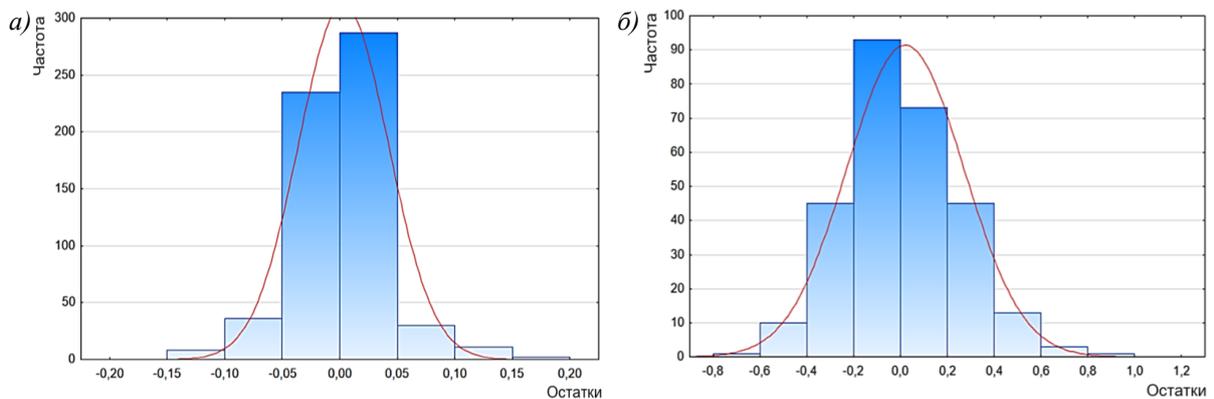


Рис. 4. Гистограмма остатков: *a* – для набора данных изгибающего момента;
б – для набора данных разрушающей нагрузки

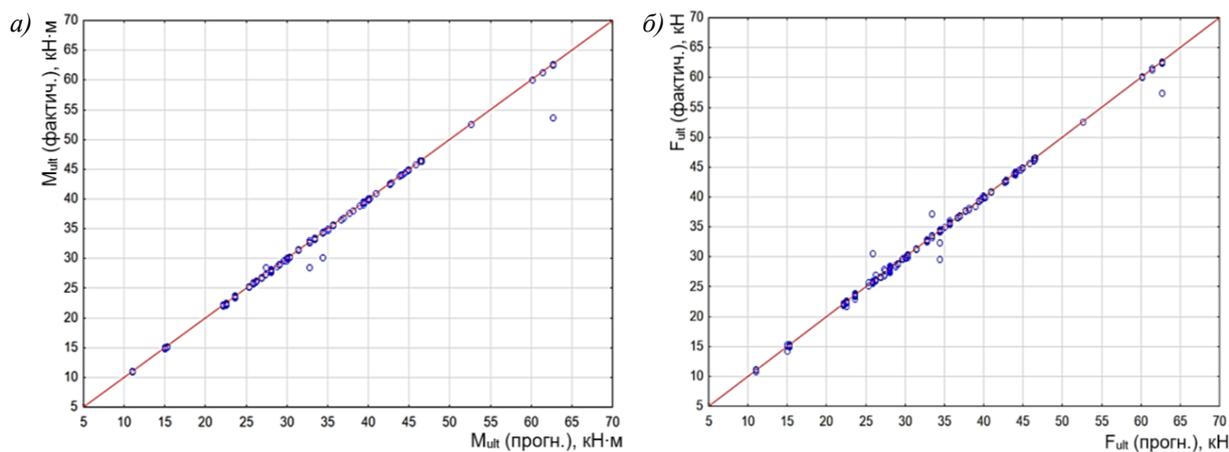


Рис. 5. Сравнение фактических и прогнозируемых значений: *а* – для набора данных изгибающего момента; *б* – для набора данных разрушающей нагрузки

Выводы. В процессе исследований было установлено, что одним из ключевых аспектов настройки моделей ИНС является определение оптимального количества нейронов на внутреннем слое сети. Результаты экспериментов показали, что оптимальное количество нейронов для эффективного прогнозирования составляет 30. Результаты показывают, что увеличение числа нейронов на внутреннем слое позволяет лучше моделировать сложные зависимости между входными и выходными переменными, но чрезмерное количество нейронов может привести к переобучению модели, что ухудшает ее способность к обобщению на новых данных.

Применение MLP при прогнозировании физико-механических характеристик железобетонных конструкций предлагает большую гибкость в настройке параметров, таких как количество слоев, число нейронов в каждом слое и тип функции активации, что позволяет адаптировать модель под конкретные задачи и условия эксплуатации. Этот подход обеспечивает высокую универсальность модели, позволяя ей эффективно обучаться на больших объемах данных, что особенно важно в контексте анализа железобетонных конструкций на различных стадиях их жизненного цикла.

Применение ИНС для прогнозирования несущей способности строительных конструкций, в частности железобетонных элементов, имеет несколько важных преимуществ. Во-первых, ИНС могут учитывать множество факторов, таких как коррозионные процессы и степень повреждения арматуры, что позволяет более точно предсказывать остаточную прочность материалов. Во-вторых, в отличие от традиционных методов, ИНС не требуют жестких предположений о функциональной форме зависимости между параметрами, что позволяет использовать их для более широкого спектра задач и условий

эксплуатации. В-третьих, разработанные модели позволяют повысить надежность конструкций за счет точного предсказания их предельных состояний и своевременного принятия мер по предотвращению разрушения.

Таким образом, использование ИНС, и в частности многослойных перцептронов, для прогнозирования несущей способности железобетонных элементов является перспективным направлением, которое обеспечивает высокую точность прогнозов, улучшает управление жизненным циклом конструкций и повышает их надежность и долговечность. Разработанные модели продемонстрировали свою эффективность, допуская MAE не более 0,85 %, что свидетельствует о возможности их применения для решения практических задач в строительной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко В.М. Элементы диссипативной теории силового сопротивления железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 2. С. 47–57.
2. Кецко Е.С., Римшин В.И., Лесовик Р.В., Смоляго Г.А. Жизненный цикл здания образовательной организации с проверкой состояния несущих конструкций. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/58SAVN623.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).
3. Римшин В.И., Соловьев А.К., Амелин П.А., Никитин А.А. Теория деградации в жизненном цикле зданий и сооружений [Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/45SAVN523.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).
4. Смоляго Г.А., Фролов Н.В., Дронов А.В. Анализ коррозионных повреждений эксплуати-

руемых изгибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 1. С. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715.

5. Feng G., Jin Z., Jiang Y., Wang X., Zhu D. Localized corrosion propagation of steel in cracked mortar and long-term corrosion of steel reinforcement in cracked concrete in seawater environment // Corrosion Science. 2024. Vol. 228. 111793. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111793.

6. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., Крючков А.А. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3(22). С. 138–146. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_138.

7. Gómez-Luna G.F., López-Calvo H.Z., Bremner T.W., Fajardo-San Miguel G.J., Castro-Borges P., Montes-García P. Assessment of corrosion prevention methods for steel reinforcement embedded in concrete exposed to a natural marine environment // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 385. 131514. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131514.

8. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 2(2). С. 46–60.

9. Zhang G., Tian Y., Zhao R., Liu Y., Shao Y., Feng H., Jin N., Jin X., Wu H., Yan D., Zhou Z., Wang Sh., Zhang Zh., Li B., Wang J. Dynamic self-balanced electrochemical model for non-uniform corrosion of steel reinforcement in concrete under combined effects of heat-moisture-chlorine-oxygen // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 80. 108117. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.108117.

10. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Pp. 012–060. DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012060.

11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 3(103). 10303. DOI 10.34910/MCE.103.3.

12. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., Фролов Н.В. Композитное усиление железобетонных изгибаемых элементов, поврежденных под воздействием хлоридной агрессивной среды // Эксперт: теория и практика. 2023. № 1(20). С. 29–34. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_29.

13. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных балок, усиленных композитными материалами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019. № 3. С. 102–107.

14. Elghazy M., El Refai A., Ebead U., Nanni A. Effect of corrosion damage on the flexural performance of RC beams strengthened with FRCM composites // Compos. Struct. 2017. Vol. 180. Pp. 994–1006. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.069.

15. Al-Saidy A.H., Saadatmanesh H., El-Gamal S., Al-Jabri K.S., Waris B.M. Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets // Materials and Structures / Matériaux et Constructions. 2016. Vol. 49. Pp. 3733–3747. DOI: 10.1617/s11527-015-0751-y.

16. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual strength of corroded reinforced concrete beams using an Adaptive Model based on ANN // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2015. Vol. 9. No 2. Pp. 159–172. DOI: 10.1007/s40069-015-0097-4/

17. Abdalla J.A., Elsanosi A., Abdelwahab A. Modelling and simulation of shear resistance of R/C beams using artificial neural network // J Franklin I. 2007. Vol. 344. Pp. 741–756. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2005.12.005.

18. Bai J., Wild S., Ware J.A. Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash // Advances in Engineering Software. 2003. Vol. 34. Pp. 663–669. DOI: 10.1016/S0965-9978(03)00102-9.

19. Римшин В.И., Соловьев А.К., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4(23). С. 101–107. DOI 10.51608/26867818_2023_4_101.

20. Римшин В.И., Кучеренко В.А. Применение искусственного интеллекта при обследовании арматуры зданий и сооружений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 1(781). С. 39–46. DOI 10.32683/0536-1052-2024-781-1-39-46.

21. Erdem H. Prediction of the moment capacity of reinforced concrete slabs in fire using artificial neural networks // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Pp. 270–276. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.07.006.

22. Kumar E.P., Sharma E.P. Artificial Neural Networks – A Study // International Research Journal of Engineering and Technology. 2014. Vol. 2. Pp. 143–148.

23. Maaddawy T.E., Soudki K., Topper T. Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams // *ACI Structural Journal*. 2005. Vol. 102. No. 5. Pp. 649–656.
24. Mangat P.S., Elgarf M.S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement // *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. No. 1. Pp. 149–159.
25. Попеско А.И. Коррозия железобетонных конструкций и их несущая способность // *Инженерные проблемы современного железобетона*. 1995. С. 299–304.
26. Jin W.L., Zhao Y.X. Test study on bending strength of corroded reinforced concrete beams // *Industrial Construction*. 2001. Vol. 31(5). Pp. 9–11.
27. Hui Y.L., Li R., Lin Z.S., Quan M.Y. Experimental studies on the property before and after corrosion of rebars in basic concrete members // *Industrial Construction*. 1997. Vol. 27(4). Pp. 14–18.
28. Cao F.B., Wang C.X., Liu L.G., Xin Y.D., Li J.H., Tian Z.G. Experimental study and rigidity analysis on corroded reinforced recycled concrete beams // *Building Structure*. 2015. Vol. 45(10). Pp. 49–55. DOI: 10.1007/s11709-020-0637-0.
29. Xia J., Jin W.L., Li L.Y. Effect of chloride-induced reinforcing steel corrosion on the flexural strength of reinforced concrete beams // *Magazine of Concrete Research*. 2012. Vol. 64(6). Pp. 471–485. DOI: 10.1680/macr.10.00169.
30. Azad A.K., Ahmad S., Al-Gohi B.H.A. Flexural strength of corroded reinforced concrete beams // *Magazine of Concrete Research*. 2010. Vol. 62(6). Pp. 405–414. DOI: 10.1680/macr.2010.62.6.405.
31. Azad A.K., Ahmad S., Azher S.A. Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams // *ACI Materials Journal*. 2007. Vol. 104(1). Pp. 40–47.
32. Shang D.F. Study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams. Dissertation for the Doctoral Degree. Shanghai: Tongji University, 2005. 115 p.
33. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement // *Construction & Building Materials*. 1997. Vol. 11(4). 239248.
34. Chen J. Study on degradation regularity of bearing capacity of RC beams under corrosive conditions // *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*. 2013. Vol. 33. Pp. 83–87.
35. Zhang Z. Experimental study of bending behavior of corroded reinforced concrete beams. Dissertation for the Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. 156 p.
36. Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 2. С. 22–24.
37. Фролов Н.В. Экспериментальные исследования кинетики развития коррозионных повреждений бетона в изгибаемых железобетонных элементах при силовых и средовых воздействиях // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 2. С. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43.
38. Wang Y., Wu J. Flexural Behavior of Corroded Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer // *Materials*. 2023. Vol. 16. 4355. DOI: 10.3390/ma16124355.
39. Михуб А., Польской П.П., Маилян Д.Р., Блягоз А.М. Сопоставление опытной и теоретической прочности железобетонных балок, усиленных композитными материалами, с использованием разных методов расчета // *Новые технологии*. 2012. Вып. 4. С. 101–110.
40. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // *Вестник МГСУ*. 2011. №8. С. 181–185.
41. Быков А.А., Третьякова А.Н., Калугин А.В., Балакирев А.А. Определение несущей способности изгибаемых элементов, усиленных композиционными материалами // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 7. С. 18–21.
42. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами // *Наукоедение. Систем. требования: AdobeAcrobatReader*. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (дата обращения: 27.08.2024).
43. Vieira M.M., Santos A.R.S. Mont'alverne A.M., Bezerra L.M., Montenegro L.C.S., Cabral A.E.B. Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened in bending with carbon fiber reinforced polymer // *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*. 2016. Vol. 9(1). Pp. 123–152. DOI: 10.1590/S1983-41952016000100008

Информация об авторах

Римшин Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент отделения строительных наук. E-mail: v.rimshin@niist.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук. Россия, 127238, г. Москва, проезд Локомотивный, д. 21.

Амелин Павел Андреевич, ассистент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleymanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 07.08.2024 г.

© Римшин В.И., Амелин П.А., Сулейманова Л.А., 2024

^{1,2}*Rimshin V.I.*, ^{3,*}*Amelin P.A.*, ³*Suleymanova L.A.*
¹*National Research Moscow State University of Civil Engineering*
²*Research Institute of Building Physics*
of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
³*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*
**E-mail: p.amelin@inbox.ru*

NEURAL NETWORK FORECASTING OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Abstract. *The article is devoted to the study of the force resistance of reinforced concrete bending elements at various stages of their life cycle, taking into account corrosion damage to the reinforcement and subsequent composite reinforcement. The paper considers changes in the characteristics of reinforced concrete structures under the influence of operational and aggressive environmental factors, which leads to a decrease in their bearing capacity. The main attention is paid to the corrosion of reinforcing steel, which causes cracking of the concrete coating and a decrease in the cross-section of the reinforcement, reducing the durability of the structure. To predict the residual strength and bearing capacity of reinforced concrete elements, an approach based on the use of artificial neural networks is proposed. Forecasting was carried out using artificial neural networks in the Statistica software package. Multilayer perceptron models were developed and tested using test data for reinforced concrete beams with various damages and reinforcements. Artificial neural network models were validated using cross-validation and showed high stability to changes in input data, which confirms their suitability for practical application in civil engineering for assessing the residual bearing capacity. The use of artificial neural networks allows taking into account nonlinear dependencies between parameters and improves predicted results, which makes them a more reliable tool compared to traditional methods.*

Keywords: *reinforced concrete structures, reinforcement corrosion, artificial neural networks, strength prediction, multilayer perceptron, composite reinforcement, life cycle modeling*

REFERENCES

1. Bondarenko V.M. Elements of the dissipative theory of force resistance of reinforced concrete [Elementy dissipativnoj teorii silovogo soprotivleniya zhelezobetona]. Structural mechanics of engineering structures and constructions. 2014. No. 2. Pp. 47–57. (rus)
2. Ketsko E.S., Rimshin V.I., Lesovik R.V., Smolyago G.A. Life cycle of the building of an educational organization with checking the condition of load-bearing structures [ZHiznennyj cikl zdaniya obrazovatel'noj organizacii s proverkoj sostoyaniya nesushchih konstrukcij]. Bulletin of Eurasian Science. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/58SAVN623.pdf> (Accessed 27 august 2024) (rus)
3. Rimshin V.I., Soloviev A.K., Amelin P.A., Nikitin A.A. Theory of degradation in the life cycle of buildings and structures [Teoriya degradacii v zhiznennom cikle zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of

Eurasian Science. System requirements: AdobeAcrobatReader. URL: <https://esj.today/PDF/45SAVN523.pdf> (Accessed 27 august 2024) (rus)

4. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analysis of corrosion damage to operated bending reinforced concrete structures of buildings and structures [Analiz korrozionnyh povrezhdenij ekspluatiruemyh izgibaemyh zhelezobetonnih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 1. Pp. 52–57. DOI: 10.12737/article_5c506209065dd6.02007715. (rus)

5. Feng G., Jin Z., Jiang Y., Wang X., Zhu D. Localized corrosion propagation of steel in cracked mortar and long-term corrosion of steel reinforcement in cracked concrete in seawater environment. Corrosion Science. 2024. Vol. 228. 111793. DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111793.

6. Rimshin V.I., Suleimanova L.A., Amelin P.A., Kryuchkov A.A. Experimental studies of bending reinforced concrete elements with damaged reinforcement due to contact with a chloride aggressive environment [Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov, imeyushchih povrezhdeniya armatury vsledstvie kontakta s hloridnoy agressivnoy sredoy]. *Expert: Theory and Practice*. 2023. No. 3(22). Pp. 138–146. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_138. (rus)
7. Gómez-Luna G.F., López-Calvo H.Z., Bremner T.W., Fajardo-San Miguel G.J., Castro-Borges P., Montes-García P. Assessment of corrosion prevention methods for steel reinforcement embedded in concrete exposed to a natural marine environment. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 385. 131514. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131514.
8. Ovchinnikov I.I. Current state of the problem of calculating reinforced structures exposed to aggressive environments [Sovremennoe sostoyanie problemy rascheta armirovannyh konstrukcij, podvergayushchihsvya vozdeystviyu agressivnyh sred]. *Construction of unique buildings and structures*. 2012. No. 2(2). Pp. 46–60. (rus)
9. Zhang G., Tian Y., Zhao R., Liu Y., Shao Y., Feng H., Jin N., Jin X., Wu H., Yan D., Zhou Z., Wang Sh., Zhang Zh., Li B., Wang J. Dynamic self-balanced electrochemical model for non-uniform corrosion of steel reinforcement in concrete under combined effects of heat-moisture-chlorine-oxygen. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. 108117. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.108117.
10. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Kechutkina E.L. Modeling of the reinforced concrete structure performance at joint influence of mechanical and chemical loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Pp. 012–060. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012060.
11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3(103). 10303. DOI: 10.34910/MCE.103.3.
12. Rimshin V.I., Suleimanova L.A., Amelin P.A., Frolov N.V. Composite reinforcement of reinforced concrete bending elements damaged under the influence of a chloride aggressive environment [Kompozitnoe usilenie zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, povrezhdennyh pod vozdeystviem hloridnoy agressivnoy sredy]. *Expert: theory and practice*. 2023. No. 1 (20). Pp. 29–34. DOI: 10.51608/26867818_2023_1_29. (rus)
13. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Experimental studies of cracking in reinforced concrete beams reinforced with composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnyh balok, usilennyh kompozitnymi materialami]. *Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019. No. 3. Pp. 102–107. (rus)
14. Elghazy M., El Refai A., Ebead U., Nanni A. Effect of corrosion damage on the flexural performance of RC beams strengthened with FRCM composites. *Compos. Struct.* 2017. Vol. 180. Pp. 994–1006. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.069.
15. Al-Saidy A.H., Saadatmanesh H., El-Gamal S., Al-Jabri K.S., Waris B.M. Structural behavior of corroded RC beams with/without stirrups repaired with CFRP sheets. *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*. 2016. Vol. 49. Pp. 3733–3747. DOI: 10.1617/s11527-015-0751-y.
16. Imam A., Anifowose F., Azad A.K. Residual strength of corroded reinforced concrete beams using an Adaptive Model based on ANN // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. Vol. 9. No 2. Pp. 159–172. DOI: 10.1007/s40069-015-0097-4/
17. Abdalla J.A., Elsanosi A., Abdelwahab A. Modelling and simulation of shear resistance of R/C beams using artificial neural network. *J Franklin I.* 2007. Vol. 344. Pp. 741–756. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2005.12.005.
18. Bai J., Wild S., Ware J.A. Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash. *Advances in Engineering Software*. 2003. Vol. 34. Pp. 663–669. DOI: 10.1016/S0965-9978(03)00102-9.
19. Rimshin V.I., Soloviev A.K., Suleimanova L.A., Amelin P.A. Neural network forecasting of physical and mechanical characteristics of composite materials used to strengthen building structures [Nejrosetevoie prognozirovanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik kompozitnyh materialov ispol'zuemyh dlya usileniya stroitel'nyh konstrukcij]. *Expert: Theory and Practice*. 2023. No. 4 (23). Pp. 101–107. DOI: 10.51608/26867818_2023_4_101. (rus)
20. Rimshin V.I., Kucherenko V.A. Application of artificial intelligence in the inspection of reinforcement of buildings and structures [Primenenie iskusstvennogo intellekta pri obsledovanii armatury zdaniy i sooruzhenij]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2024. No. 1 (781). Pp. 39–46. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-781-1-39-46. (rus)
21. Erdem H. Prediction of the moment capacity of reinforced concrete slabs in fire using artificial neural networks // *Advances in Engineering Software*. 2010. Vol. 41. Pp. 270–276. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.07.006.

22. Kumar E.P., Sharma E.P. Artificial Neural Networks – A Study // International Research Journal of Engineering and Technology. 2014. Vol. 2. Pp. 143–148.
23. Maaddawy T.E., Soudki K., Topper T. Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2005. Vol. 102. No. 5. Pp. 649–656.
24. Mangat P.S., Elgarf M.S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. No. 1. Pp. 149–159.
25. Popesko A.I. Corrosion of reinforced concrete structures and their load-bearing capacity [Korroziya zhelezobetonnykh konstrukcij i ih nesushchaya sposobnost']. Engineering problems of modern reinforced concrete. 1995. Pp. 299–304. (rus)
26. Jin W.L., Zhao Y.X. Test study on bending strength of corroded reinforced concrete beams. *Industrial Construction*. 2001. Vol. 31(5). Pp. 9–11.
27. Hui Y.L., Li R., Lin Z.S., Quan M.Y. Experimental studies on the property before and after corrosion of rebars in basic concrete members. *Industrial Construction*. 1997. Vol. 27(4). Pp. 14–18.
28. Cao F.B., Wang C.X., Liu L.G., Xin Y.D., Li J.H., Tian Z.G. Experimental study and rigidity analysis on corroded reinforced recycled concrete beams. *Building Structure*. 2015. Vol. 45(10). Pp. 49–55. DOI: 10.1007/s11709-020-0637-0.
29. Xia J., Jin W.L., Li L.Y. Effect of chloride-induced reinforcing steel corrosion on the flexural strength of reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*. 2012. Vol. 64(6). Pp. 471–485. DOI: 10.1680/mac.10.00169.
30. Azad A.K., Ahmad S., Al-Gohi B.H.A. Flexural strength of corroded reinforced concrete beams. *Magazine of Concrete Research*. 2010. Vol. 62(6). Pp. 405–414. DOI: 10.1680/mac.2010.62.6.405.
31. Azad A.K., Ahmad S., Azher S.A. Residual strength of corrosion-damaged reinforced concrete beams. *ACI Materials Journal*. 2007. Vol. 104(1). Pp. 40–47.
32. Shang D.F. Study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams. Dissertation for the Doctoral Degree. Shanghai: Tongji University, 2005. 115 p.
33. Rodriguez J., Ortega L.M., Casal J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement. *Construction & Building Materials*. 1997. Vol. 11(4). 239248.
34. Chen J. Study on degradation regularity of bearing capacity of RC beams under corrosive conditions. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*. 2013. Vol. 33. Pp. 83–87.
35. Zhang Z. Experimental study of bending behavior of corroded reinforced concrete beams. Dissertation for the Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. 156 p.
36. Smolyago G.A., Kryuchkov A.A., Drokin S.V., Dronov A.V. Study of aspects of chloride corrosion of reinforced concrete structures [Issledovanie aspektov hloridnoj korrozii zhelezobetonnykh konstrukcij]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 2. Pp. 22–24. (rus)
37. Frolov N.V. Experimental studies of the kinetics of development of corrosion damage to concrete in bending reinforced concrete elements under force and environmental influences [Eksperimental'nye issledovaniya kinetiki razvitiya korroziionnykh povrezhdenij betona v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementah pri silovykh i sredovykh vozdeystviyah]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 2. Pp. 34–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-34-43. (rus)
38. Wang Y., Wu J. Flexural Behavior of Corroded Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer. *Materials*. 2023. Vol. 16. 4355. DOI: 10.3390/ma16124355.
39. Mihub A., Polskoy P.P., Mailyan D.R., Blagoz A.M. Comparison of experimental and theoretical strength of reinforced concrete beams reinforced with composite materials using different calculation methods [Sopostavlenie opytnoj i teoreticheskoj prochnosti zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi materialami, s ispol'zovaniem raznykh metodov rascheta]. *Novye tekhnologii*. 2012. Issue 4. Pp. 101–110. (rus)
40. Grigorieva Ya.E. Experimental study of the effect of external reinforcement of bending reinforced concrete beams with carbon fiber on the strength and rigidity of structures [Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya vneshnego armirovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh balok uglevoloknom na prochnost' i zhestkost' konstrukcij]. *Bulletin of MGSU*. 2011. No. 8. Pp. 181–185. (rus)
41. Bykov A.A., Tretyakova A.N., Kalugin A.V., Balakirev A.A. Determination of the bearing capacity of bending elements reinforced with composite materials [Opredelenie nesushchej sposobnosti izgibaemykh elementov, usilennykh kompozitsionnymi materialami]. *Industrial and Civil Engineering*. 2011. No. 7. Pp. 18–21. (rus)
42. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and high temperatures of reinforced concrete samples reinforced with polymer composite materials [Eksperimental'nye issledovaniya pri ponizhennykh i povyshennykh temperaturah zhelezobetonnykh obrazcov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami]. *Naukovedenie*. System requirements:

AdobeAcrobatReader. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (Accessed 27 august 2024) (rus)

Information about the authors

Rimshin, Vladimir I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Department of Construction Sciences. E-mail: v.rimshin@niist.ru.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26/ Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Russia, 127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21.

Amelin, Pavel A. Assistant of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: p.amelin@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod st. Kostyukova, 46.

Suleymanova, Lyudmila A. DSc, Professor, Head of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 07.08.2024

Для цитирования:

Римшин В.И., Амелин П.А., Сулейманова Л.А. Нейросетевое прогнозирование несущей способности железобетонных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 42–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-42-55

For citation:

Rimshin V.I., Amelin P.A., Suleymanova L.A. Neural network forecasting of the load-bearing capacity of reinforced concrete elements. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 42–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-42-55

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-56-70

**Ладик Е.И., Перькова М.В., Чернышева Н.В.*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

ОСОБЕННОСТИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ВДОЛЬ СТАРОЛАДОЖСКОГО КАНАЛА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. В статье рассмотрены этапы строительства Староладожского канала и градостроительного освоения прилегающих к нему территорий, а также особенности архитектурно-планировочной структуры городов Шлиссельбург и Новая Ладога. Был проведен ретроспективный анализ архитектурно-планировочного формирования городов Шлиссельбург и Новая Ладога, выявлены особенности их архитектурной среды, проанализировано современное состояние объектов культурного наследия, выделены объекты, нуждающиеся в реставрации и приспособлении для современного использования. Определены современные градостроительные проблемы в населенных пунктах близ Староладожского канала, в том числе: загрязнение водных объектов, заболачивание русла канала, приводящие к его деградации? разрушение объектов культурного наследия, отсутствие идентичности водного фасада, наличие диссонирующей застройки и др. Проведена оценка историко-культурного потенциала территорий вдоль береговой линии Староладожского канала и выделены потенциальные опорные центры культурно-познавательного туризма различных уровней, ключевыми среди которых являются г. Шлиссельбург и г. Новая Ладога, а также д. Кобона. Определены направления перспективного развития территорий городов Новая Ладога и Шлиссельбург. Рассмотрены перспективные направления реорганизации исторического центра г. Шлиссельбург. Разработано предложение по организации водно-туристических маршрутов по Староладожскому каналу с сопутствующим развитием туристической инфраструктуры.

Ключевые слова: Староладожский канал, объекты культурного наследия, исторические города, архитектурно-инженерные объекты

Введение. Территория Ленинградской области обладает высоким культурно-туристическим потенциалом [1]. Города и поселения Ленинградской области нуждаются в анализе современного состояния исторической застройки, выявлении памятников архитектуры, требующих реставрации и приспособлении под современные функции. Одним из наиболее значимых объектов культурного наследия Ленинградской области является Староладожский канал. Он относится к объектам культурного наследия федерального значения и признан объектом всемирного наследия ЮНЕСКО. Однако, на сегодняшний день канал находится в неудовлетворительном состоянии, большая часть русла заболочена, исторический вид сохранился на участках в городах Шлиссельбург и Новая Ладога. Восстановление и развитие водного сообщения по каналу является перспективным для развития сферы культурно-познавательного туризма в регионе [2, 3]. Кроме того, города и поселения, расположенные вдоль береговой линии Староладожского канала, обладают значительным историко-культурным и природным потенциалом, ключевыми среди них являются Шлиссельбург и Новая Ладога, а также деревни Кобона, Лаврово и Дубно [4, 5].

Актуальность исследования обусловлена значимостью изучения Староладожского канала как одного из крупнейших исторических инже-

нерно-архитектурных объектов, а также необходимостью поиска путей его сохранения и восстановления его функционирования в качестве транспортной артерии и культурно-туристического маршрута.

Целью исследования является анализ архитектурно-планировочных особенностей населенных пунктов вдоль Староладожского канала, а также поиск перспективных направлений их градостроительного развития. Основные задачи исследования включали: ретроспективный анализ развития территорий вдоль Староладожского канала; выявление особенностей исторической застройки населенных пунктов близ береговой линии канала; оценку их культурно-туристического потенциала и выявление перспективных направлений развития.

Объектом исследования являются Староладожский канал и исторические поселения на прилегающих к нему территориях: г. Шлиссельбург, д. Лаврово, д. Кобона, д. Дубно и г. Новая Ладога. Предметом исследования являются особенности архитектурно-планировочной организации территорий, расположенных вдоль Староладожского канала в Волховском и Кировском муниципальных районах.

Анализу историко-культурной среды Ленинградской области посвящены работы Т.А. Славинной, К.Ю. Губинской, В.С. Горюнова, С.П. Зава-

рихина. Особенности территорий вдоль Староладожского канала рассмотрены в исследованиях С.В. Семенцова, Н.А. Акуловой, И.Б. Цыденовой, С.В. Клименко. Процесс возрождения архитектурной среды малых исторических городов Ленинградской области на примере города Новая Ладога изучен в исследованиях А.С. Митяева, Н.А. Акуловой, Е.И. Ельниковой.

В исследовании рассмотрен ряд работ, посвященных изучению историко-культурного туристического потенциала территорий Ленинградской области: труды С.И. Лутченко, А.В. Григорьева, М.В. Киреева. Комплексно-градостроительный подход и этапность развития территорий Ленинградской области, отражены в проектных работах научно-исследовательского института «ЛенНИИГрадостроительства».

Однако, на сегодняшний день еще не в полной мере изучено современное состояние населенных пунктов и межселенных территорий, расположенных вдоль Староладожского канала.

Материалы и методы исследования. Исследование основано на комплексном подходе к анализу территорий. Методы исследования включали в себя: ретроспективный анализ этапов развития территорий близ Староладожского канала, ландшафтно-визуальный анализ, натурные обследования объектов культурного наследия, проблемный анализ. В ходе исследования проводилась оценка историко-культурного, природно-экологического, инфраструктурного потенциала территорий, применялись методы систематизации архивных и литературных источников.

В качестве материалов исследования выступают архивные и литературные источники, а также документы об охране ОКН. В работе использованы сведения из исторических очерков и научных статей. В качестве основных материалов для исследования послужили исторические атласы и карты русского географического общества, а также фотодокументы ЦГАКФФД СПб.

Основная часть. Староладожский канал берет свое начало в городе Шлиссельбург в месте впадения реки Невы в Ладожское озеро и тянется до города Новая Ладога, впадая в реку Волхов. На протяжении многих лет он являлся главным водным торговым путем, по которому в Санкт-Петербург проходила большая часть судов и грузов. Канал представляет собой комплекс гидротехнических сооружений, состоящий из системы шлюзов, резервных прудов, а также мостов с шандорными устройствами, которые позволяли регулировать уровень воды в канале [6]. Архитектурный облик Староладожского канала сформировали не только инженерные сооружения, но и здания: храмы, жилые дома, караулки. Влияние

канала отразилось на развитии городов Шлиссельбурга, Новой Ладоги и поселков, которые расположены вдоль береговой линии.

Ретроспективный анализ этапов строительства и функционирования канала. В результате исследования историко-графических материалов выявлены этапы строительства и функционирования канала (рис. 1).

1. *Этап строительства и частичной эксплуатации (1718–1730 гг.).* Строительство канала началось при Петре I, в 1719 г. На этом этапе строительство велось на территориях от Новой Ладоги до деревни Дубно. Изначально строительство велось подрядчиками под руководством Г. Скорнякова-Писарева, однако позднее обязательства по строительству канала перешли к государству. На следующем этапе строительство канала продолжилось под руководством Б.Х. Миниха [7]. В 1730 г. под руководством Миниха строительство канала было завершено и в 1731 г. состоялось открытие канала [8]. При строительстве не были учтены некоторые местные гидрологические особенности, в этой связи в 1732 г. возникла необходимость сооружения шлюзов в Шлиссельбурге и Новой Ладоге.

2. *Этап реконструкции и расширения (1760–1820-е гг.).* В первые годы эксплуатации канала выявились проблемы: частые обрушения берегов, заиливание и узость канала затрудняли движение судов. Поэтому в 1766–1805 гг. была проведена масштабная реконструкция под руководством инженеров К.П. Шкурина и И.И. Герарда. Канал был расширен, углублен, берега укреплены, построены дополнительные шлюзы, мосты и пристани. Это позволило увеличить пропускную способность канала и улучшить его эксплуатационные характеристики.

3. *Этап интенсивной эксплуатации и развития (1830-е – 1880 гг.).* В середине XIX века канал достиг пика своего использования. Через него проходил основной поток грузов между Волгой и Балтикой, что стимулировало экономическое развитие региона. В 1866 году был открыт Новый Ладожский канал, дублировавший Староладожский, что снизило нагрузку на старый канал. В конце XIX века начались работы по модернизации обоих каналов, включая замену деревянных шлюзов на каменные и расширение русел, а в 1880-х гг. были построены Новосяський и Новосвирский каналы.

4. *Этап упадка и частичной консервации (1880-е – 1960 гг.).* С развитием железнодорожного и автомобильного транспорта значение водных путей постепенно снижалось. Староладожский канал утратил свое значение. В 1962 г. канал со всеми сооружениями был снят с баланса Невско-Ладожского технического участка как

«потерявший народнохозяйственное значение» и перестал использоваться для судоходства, некоторые его участки были заброшены, а инфраструктура начала разрушаться.

5. Этап с 1980 г. по настоящее время. В настоящее время канал не используется, часть канала обмелела, заилилась. Исторический вид канала частично сохранился в центральной части городов Шлиссельбург и Новая Ладога.



Рис. 1. Временная шкала строительства и эксплуатации Староладожского канала.
Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Влияние строительства Староладожского канала на градостроительное развитие близлежащих городов и поселений. На раннем этапе строительство канала охватывало территории от Новой Ладоги до деревни Дубно. Город Новая Ладога расположен на левом берегу реки Волхов. Благодаря градообразующей роли канала город активно развивался. В Новой Ладоге на старом устье возник один из городских центров. Канал, в границах города, был расположен параллельно реке Волхов и стал одной из главных градостроительных осей. Вдоль него расположились сооружения для обслуживания шлюзов и торгово-стратегические объекты, многие из которых на сегодняшний день утрачены.

К концу XVIII века застройка центральной части Новой Ладоги активно развивалась. В связи с этим появились значимые объекты: гостинный двор, здание присутственных мест, провиантские склады, казармы Суздальского полка и здание при шлюзах. В 1800-х было возведено новое устье канала, соединившее Староладожский

канал и реку Волхов. В результате центральная часть города сформировалась в виде треугольника, ограниченного водными объектами. Внутри него расположилась общественно-деловая и жилая застройка, а также рекреационные зоны [9]. Ключевыми этапами в развитии города стали 1850–1890 года, во время которых модернизировалась уличная сеть северной части города. Центральная часть города развивалась до конца 19 века, главной улицей которой стал Николаевский проспект (ныне проспект Карла Маркса) [10, 11]. В период 1890–1920 годов изменилась конфигурация центральной части города, которая представляет собой регулярную сетку улиц. В новом устье в 1940 году был возведен Новолодожский судоремонтный завод, и сформировалась крупная промышленная зона. Новая Ладога понесла разрушения во времена Великой Отечественной войны, было утеряно большое количество объектов (рис. 2).

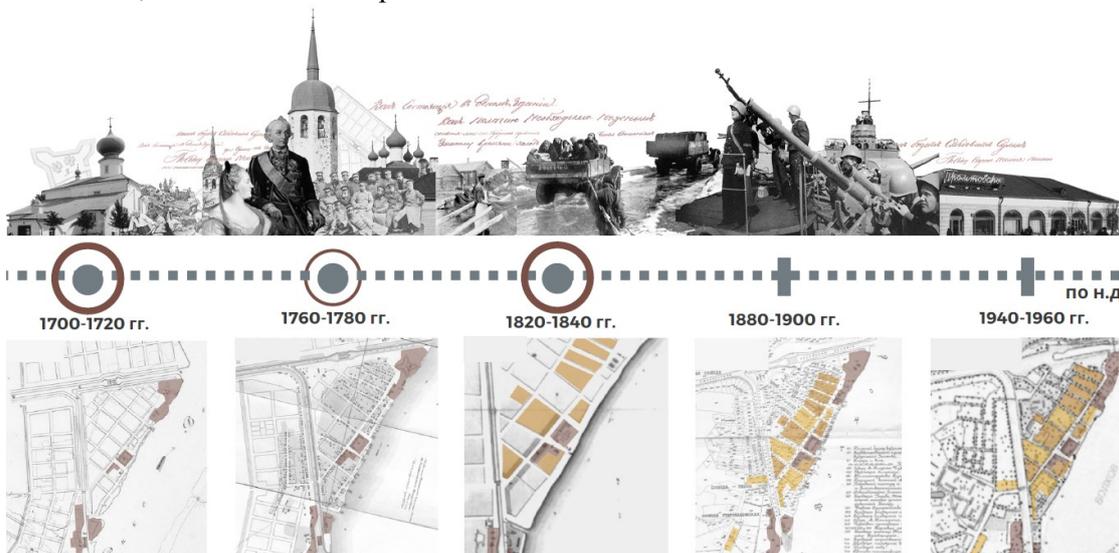


Рис. 2. Исторические этапы формирования архитектурно-планировочной структуры города Новая Ладога.
Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Канал объединил деревню Дубно с Новой Ладогой и повлиял на быт и занятия жителей. На данной территории по образцовым проектам были построены каменные караулки, возведение которых было связано с общим процессом монументализации облика канала.

Влияние Староладожского канала отразилось на градостроительном развитии Шлиссельбурга. Староладожский канал стал главной градостроительной осью и повлиял на развитие нового городского плана. Ранний план города не учитывал градостроительной роли канала, однако, после завершения возведения гидротехнических комплексов в устье канала была реализована часть нового генерального плана. Сформировалась центральная часть города с церковной и торговой площадью, которая сохранилась до наших дней [12, 13]. Центральная часть Шлиссельбурга продолжала развиваться до середины

ХІХ века, вокруг шлюзов сформировался небольшой культурно-торговый кластер, где сохранилась большая часть исторической застройки. Главным торговым центром стал Гостиный двор, а рядом расположился Дом бытовых услуг. Во время Великой Отечественной войны центральная часть города была почти полностью разрушена, утрачено множество объектов: часовня Казанской Божьей Матери и сквер вокруг нее, павильон ботиков Петра I, здание речного вокзала, здание кирпичного заводского цеха, католическая церковь Воздвижения Креста Господня (рис. 3).

Развитие при строительстве Староладожского канала происходило и в деревне Назия. Жилая застройка поселения вытянулась вдоль береговой полосы, а также появились новые объекты для обслуживания канала (караулки и мосты).

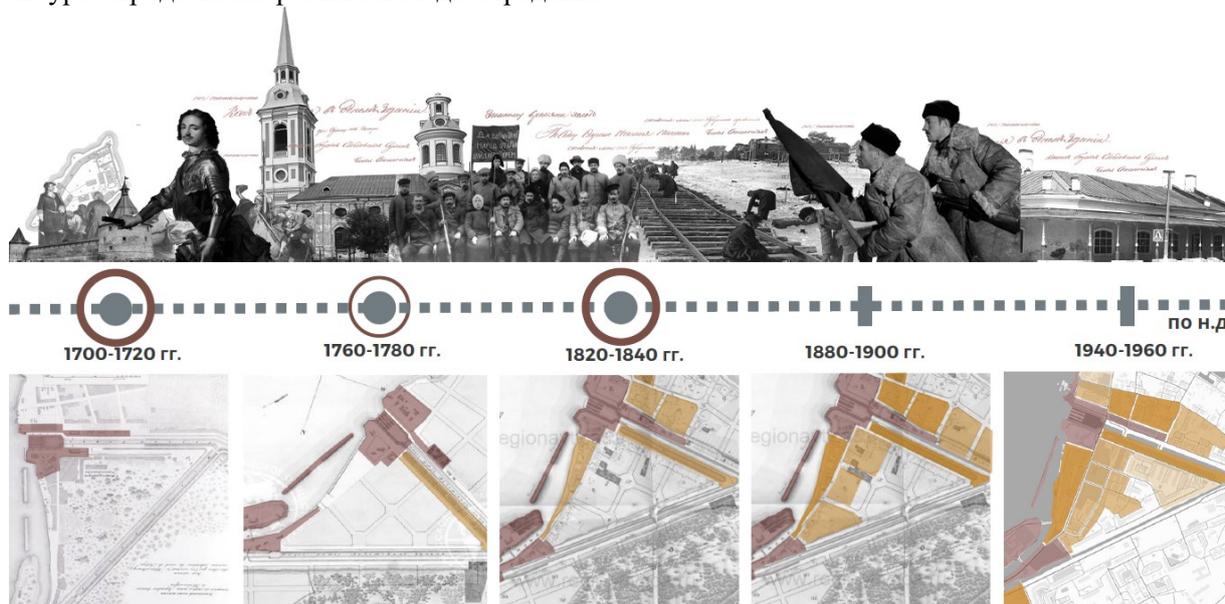


Рис. 3. Исторические этапы формирования архитектурно-планировочной структуры города Новая Ладога. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Староладожский канал представляет собой архитектурно-инженерный памятник, который повлиял развитие населенных пунктов, расположенных вдоль него: г. Шлиссельбург, д. Назия, д.

Нижняя Шальдиха, д. Лаврово, д. Кобона, д. Старая Канава, ур. Белоозерки, ур. Ленинградская Слобода, д. Лигово, д. Старое Сумское, д. Дубно, г. Новая Ладога (рис. 4).



Рис. 4. Водный фасад Староладожского канала. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Историко-культурный потенциал территорий малых городов и поселений вдоль Староладожского канала на современном этапе.

Восстановление и развитие транспортного сообщения по Староладожскому каналу является перспективным для развития водно-туристических

маршрутов. О высоком культурно-туристическом потенциале маршрута на данной территории свидетельствует наличие большого количества объектов культурного наследия и точек туристического интереса. Населенные пункты Шлиссельбург, Назия, Нижняя Шальдиха, Лаврово, Кобона, Старая Канава, Белозерки, Старое Сумское, Дубно и Новая Ладога, расположенные вдоль береговой полосы Староладожского канала, были проанализированы по степени развитости природного, историко-культурного и инфраструктурного потенциала. Выявлен их потенциал для развития в качестве опорных центров

туризма различных уровней. Наибольшим историко-культурным и инфраструктурным потенциалом обладают исторические города Шлиссельбург и Новая Ладога, являющиеся потенциальными полифункциональными опорными центрами туризма федерального уровня. Деревня Кобона рассматривается в качестве туристического центра регионального уровня. В качестве монофункциональных опорных центров рекреационного туризма рассматриваются деревни Назия, Нижняя Шальдиха, Старая канава, Лигово (рис. 5).

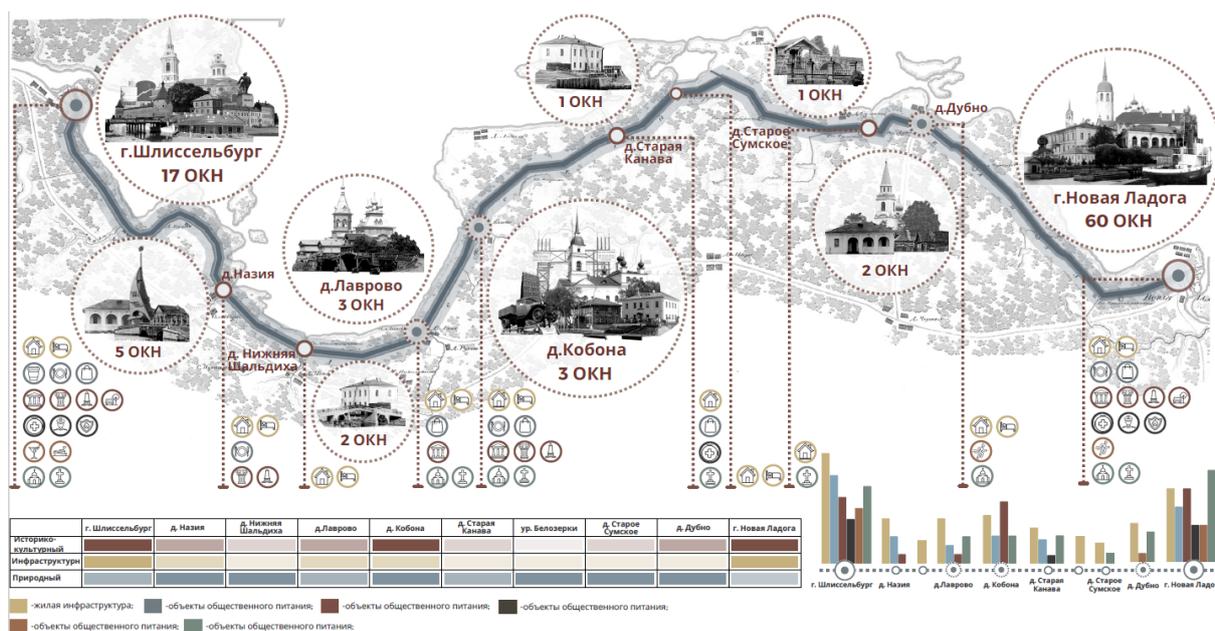


Рис. 5. Оценка туристического потенциала территорий вдоль Староладожского канала.
Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Комплексный анализ территорий позволил выявить и классифицировать ряд существующих на современном этапе градостроительных проблем развития территорий в структуре исторических населенных пунктов вдоль Староладожского канала. Экологические проблемы включают загрязнение водных объектов, нехватку систем очистки и недостаточный контроль за выбросами. На примере Староладожского канала можно рассмотреть крупный участок от поселения Старая Канава до поселения Дубно, подверженный заболоченности русла канала, а также его резервных прудов. Данная проблема приводит к медленной утрате Староладожского канала как объекта всемирного наследия ЮНЕСКО и провоцирует развитие деградации территорий, расположенных вдоль него. Транспортные проблемы являются одними из основных на рассматриваемых территориях. На развитие исторических малых городов оказывает негативное влияние плохая транспортная доступность личным и

общественным транспортом. Потеря идентичности и ее отсутствие, также, негативное отражаются на процессе современного развития исторических малых городов. Отсутствие дизайн-кода в индивидуальной жилой застройке (далее ИЖС) создает диссонирующий фон для объектов культурного наследия. Например, в городе Новая Ладога объекты культурного наследия расположены в зонах ИЖС, которые не имеют подробных рекомендаций по оформлению фасадных решений и элементов ограждений для формирования идентичного уличного фронта. Отсутствие единого дизайн-кода для коммерческих объектов приводит к появлению визуального шума и снижению привлекательности территорий, расположенных в структуре исторической среды [14]. Неконтролируемое вмешательство во внешний вид объектов культурного наследия снижает культурно-туристический потенциал исторических территорий. Одним из важнейших факторов потери исторической уникальности малых горо-

дов, расположенных на водных артериях, является отсутствие идентичности водного фасада. Нарушение правил землепользования, а также наличие диссонирующей застройки приводят к обезличиванию водного фасада и нарушению его архитектурной целостности [15]. Несмотря на выявленные проблемы, территории вдоль Староладожского канала имеют высокий потенциал для развития туризма за счет своего высокого культурного и природного потенциала.

Перспективные направления развития территорий близ Староладожского канала. Основная идея возрождения Староладожского канала - развитие водно-туристических маршрутов, которые берут свое начало в г. Санкт-Петербург по реке Неве до города Шлиссельбург и далее по каналу через деревни Дубно, Кабона, Лаврово в Новую Ладогу. Организация водного маршрута включает в себя три этапа: на первом этапе – восстановление функционирования Староладожского канала в границах города Шлиссельбург; на втором этапе – проведение работ по восстановлению канала в границах города Новая Ладога; на третьем этапе – организация территорий вдоль береговой линии в деревнях Лаврово, Кабона и Дубно (рис. 6). Для транспортировки

туристов будут использоваться различные виды водного транспорта: пассажирские теплоходы и катаера, а также каяки и каноэ для любителей активного отдыха на отдельных участках. Ключевые остановки маршрута – опорные центры туризма федерального, регионального и местного уровней, включающие в себя архитектурные памятники, музеи и выставки, посвященные истории канала и региональной культуре, а также экскурсии в природные парки и заповедники (рис. 7).

Для успешной организации туристического водного маршрута вдоль Староладожского канала необходимо провести комплексное благоустройство самого канала и прилегающих территорий. Этот процесс включает в себя несколько ключевых направлений деятельности: 1) работы по очистке и углублению русла канала, что позволит обеспечить безопасность судоходства и поддерживать оптимальную глубину воды в канале; 2) углубление русла также способствует повышению проходимости для судов различного водоизмещения, что обеспечит более комфортное и безопасное путешествие для туристов; 3) ремонт и модернизация шлюзов.

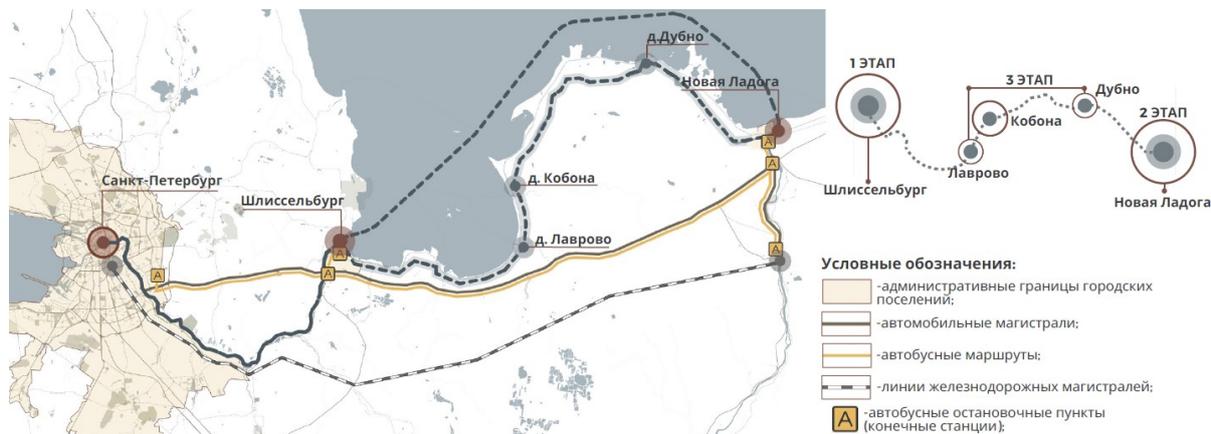


Рис. 6. Концептуальное предложение по развитию водно-туристического маршрута по Староладожскому каналу. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

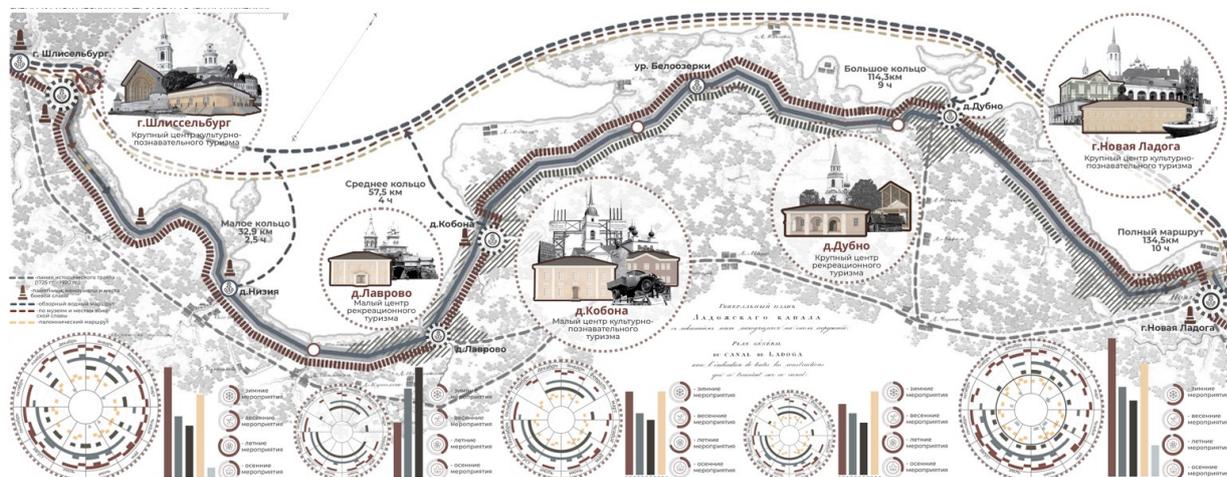


Рис. 7. Опорные центры туризма водно-туристического маршрута по Староладожскому каналу. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Создание водного маршрута включает в себя комплекс действий по развитию туристической инфраструктуры и сохранения архитектурной идентичности прилегающих территорий: строительство и модернизацию причалов; развитие сети объектов временного размещения (отелей, гостиниц, кемпингов); организация объектов общественного питания и местных гастрономических туров; развитие площадок событийного туризма (проведение исторических реконструкций, фестивалей и культурных мероприятий); органи-

зация информационной поддержки туристических маршрутов; реставрация и приспособление под современное использование объектов культурного наследия; разработка дизайн-кода для городов и поселений, расположенных вдоль береговой линии канала, с целью сохранения идентичности их архитектурной среды. Предложения по разработке дизайн-кода территории вдоль Староладожского канала должны основываться на анализе характерных элементов исторической застройки и их колористических решений (рис. 8–9).



Рис. 8. Характерные архитектурные элементы деревянной исторической застройки и анализ их колористического решения. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

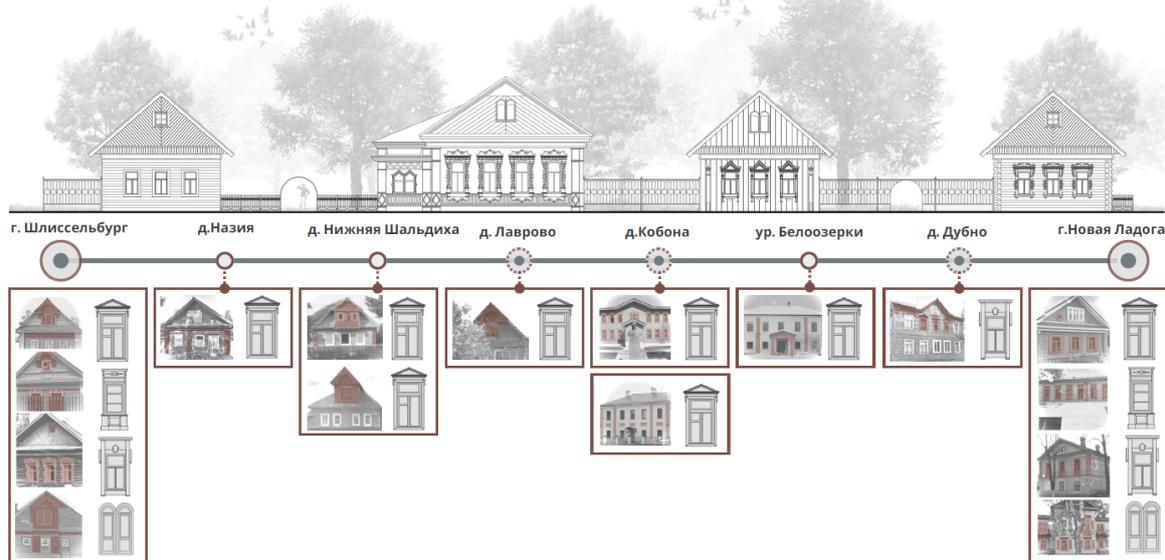


Рис. 9. Предложения по дизайн-коду в структуре ИЖС. Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Для каждого поселения, расположенного вдоль Староладожского канала необходима разработка отдельных предложений по развитию туристической инфраструктуры, в качестве ключевых опорных центров рекреационного туризма местного значения выделяются деревни Лаврово и Дубно, Кобона в качестве опорного центра туризма регионального уровня.

В Лаврово находятся два водных объекта – Староладожский канал и река Лава. Река Лава представляет собой градоформирующую водную артерию, а канал является градостроительной осью поселения. Планировочная и экологическая значимость водных объектов обосновывает необходимость их интеграции в туристическую инфраструктуру. На левом берегу Староладожского

канала необходимо предусмотреть причал для водного транспорта, который свяжет местный дом культуры и площадь. Такое решение обусловлено созданием единой связи между водно-туристическим путем вдоль канала и культурно-познавательным маршрутом внутри территорий поселения. Вдоль русла реки Лава перспективна организация пирсов для рыбалки и хранения лодок. Одним из вариантов использования данной территории является проведение сплавов вдоль русла реки Лава и Староладожского канала. На левом берегу, в месте пересечения реки с каналом предложено возведение смотровой площадки. По результатам ландшафтно-визуального анализа данная территория является видовой точкой, откуда открывается панорамный вид на реку

и гранитный водоспуск канала. Пешеходная сеть в Лаврово отсутствует, и в связи с этим необходима разработка предложений по ее формированию. Главные пешеходные связи должны вдоль Староладожского канала и главной поселковой дороги. Дополнительные пешеходные связи представлены прогулочными маршрутами, свя-

зывающими канал, основные объекты инфраструктуры, причалы и смотровую площадку. Часть пешего маршрута проходит лесной массив, на территории которого расположены мемориал, посвященный Великой Отечественной войне и церковь Николая Чудотворца. Концепция также предполагает восстановление деревянного разводного пешеходного моста (рис. 10).



Рис. 10. Концепция организации туристической инфраструктуры на территориях вдоль Староладожского канала. Деревни Лавторова, Кобона и Дубно.
Сост. Кислухина С.С., Осипов Л.А., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Сельский населенный пункт Кобона находится на трех водных объектах – Староладожском и Новолодожском каналах и реке Кобона. Данные водные объекты имеют выход в Ладожское озеро. Река Кобона и Староладожский канал являются основными градостроительными водными артериями, а также градостроительными осями поселения. На правом берегу Староладожского канала предлагается предусмотреть причал для водного транспорта, который подведен к музею «Дорога Жизни». Это решение продиктовано необходимостью интеграции водно-туристического маршрута вдоль канала в существующий культурно-познавательный маршрут. Данный маршрут включает в себя музей, Никольскую церковь, военный исторический центр «Дорога Жизни» и памятник-стелу на «Дороге жизни», в составе Ансамбля Зеленый пояс Славы Ленинграда. Вдоль реки Кобона предполагается установить небольшие пирсы для рыбалки и хранения лодок. На левом берегу Староладожского канала, в месте его пересечения с рекой предложена организация смотровой площадки с благоустройством площади памятной стелы (рис. 10).

В поселении Дубно находятся три водных объекта, и все они относятся к комплексу Староладожского канала: русло канала, резервный пруд и Дубенская протока. Пешеходная сеть в Дубно отсутствует и в связи с этим необходима

разработка предложения по ее формированию. Главную пешеходную линию рационально располагать вдоль Староладожского канала и главной поселковой дороги. Дополнительные пешеходные сети должны быть представлены прогулочными маршрутами, связывающими канал, основные объекты инфраструктуры, причалы и смотровую площадку. Концепция также предполагает восстановление деревянного разводного пешеходного моста (рис. 10).

Необходима разработка предложений по развитию территорий, прилегающих к каналу в структуре потенциального крупного опорного центра туризма федерального уровня – города Шлиссельбург. Шлиссельбург входит в состав основных межрегиональных туристических маршрутов, которые объединяют исторически значимые области и города северо-западной России. С Санкт-Петербургом в настоящее время Шлиссельбург имеет три вида транспортного сообщения: личным автомобильным, общественным рейсовым (автобусом) и железнодорожным транспортом. Стоит отметить отсутствие водного сообщения, однако ранее Шлиссельбург был связан с Новой Ладогой Староладожским каналом, который перестал функционировать. На сегодня водное сообщение является приоритетным для развития туристического потенциала города.

Город имеет высокий культурно-туристический потенциал, сохранив на своей территории значимые объекты культурного наследия региона [16, 17]. Основными архитектурными доминантами и главными точками притяжения туристов в структуре города является Благовещенский собор и крепость «Орешек». Главной композиционной осью города является Староладожский канал, вдоль которого расположены: дом А.И. фон Лейминг, купеческий жилой дом с торговыми лавками, гостиный двор и др. В г. Шлиссельбург необходимо развитие территорий городского центра, включающих в себя участки городской застройки, прилегающие к Староладожскому каналу. Предлагается организация туристического маршрута, объединяющего Староладожский канал с основными достопримечательностями. Вдоль берегов Староладожского канала необходимо благоустройство пешеходных зон и организация спусков к его руслу, восстановление

петровских шлюзов и установка пешеходного моста. Реконструкция рекреационной территории вдоль Староладожского канала включает организацию пешеходной и велосипедной сети, установку причалов и смотровой площадки (рис. 11). Концепция развития территорий городского центра также предполагает модернизацию зон зеленых насаждений общего пользования: продолжение благоустройства парка Гагарина и парка «Аллея памяти», разработку их планировочных схем. На данных территориях также предлагается воссоздание павильона ботика Петра I и его приспособление под городскую оранжерею. Также перспективно восстановление подвесного моста, который является выявленным объектом культурного наследия. Данный мост связывает левый берег канала с островом, на территории которого предусмотрена организация пешеходной линии и установка крытой смотровой площадки.



Рис. 11. Предложения по развитию центральной части г. Шлиссельбург.
Сост. Кислухина С.С., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

В рамках исследования был проведен анализ состояния объектов культурного наследия, который показал, что часть памятников архитектуры находится в аварийном состоянии. Однако, развитие территорий в структуре исторического центра города Шлиссельбург должно включать предложения по реставрации и приспособлению объектов культурного наследия, так как архитектурно-градостроительное наследие малых российских городов может и должно быть использовано в целях повышения качества жизни населения [18]. Перспективным объектом для реставрации и приспособления под новые функции является объект культурного наследия «Здание Гостиного двора». Гостиный двор в Шлиссельбурге, построенный в середине 1890-х годов по проекту В.Н. Боброва, сохранил свой первоначальный архитектурный облик до настоящего времени [19]. Здание отличается от большинства аналогичных

сооружений своими компактными размерами и уникальной архитектурной деталью: вместо традиционной аркады здесь представлена галерея, огороженная тонкими металлическими колоннами. Предметом охраны объекта культурного наследия являются фасадные и объемно-планировочные решения. В настоящее время здание бывшего Гостиного двора занимает универсам. Проведен анализ состояния здания и выявлены такие проблемы, как утрата части элементов фасада, верхнего наружного слоя облицовки, повреждения растительностью и влажностью, наличие диссонирующих элементов наружной рекламы. Перспективным является восстановление исторической функции объекта. На первом этаже предлагается размещение торговой зоны и кафе. Подвальные помещения приспособляются под зоны для хранения продуктов и товаров (рис. 12).

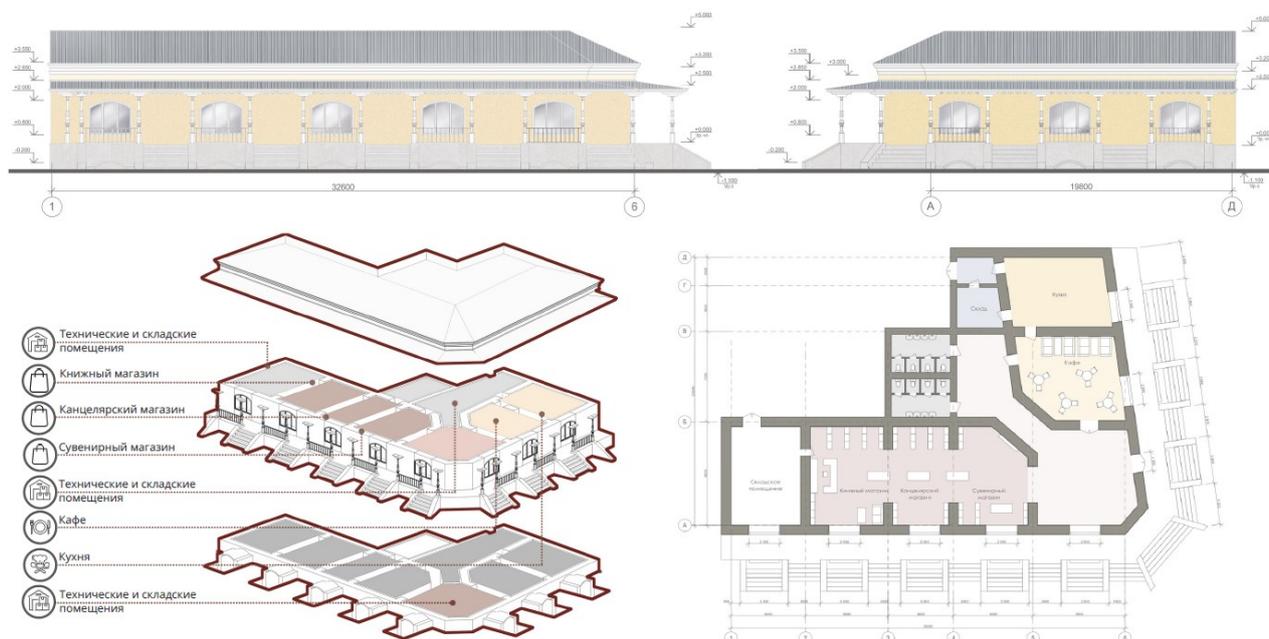


Рис. 12. Предложение по приспособлению здания гостиного двора.
Сост. Кислухина С.С., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Так же возможно воссоздание части утраченных объектов культурного наследия. Перспективным для воссоздания является павильон ботика Петра I. Архитектурное решение павильона предусматривало использование чугунных колонн, а стены представляли собой железную сетку для обеспечения естественной вентиляции. Павильон был спроектирован И.Э. Жибером, в него для вечного хранения был помещен ботик Петра I, на котором император в 1724 г. совершил плавание из Дубно в Ладогу по завершеному участку канала. В павильоне также хранились деревянные лопатки, которыми Петр I и Анна Петровна открывали перемычки на готовых участках

канала и знамена Ладожского канального батальона, учрежденного в 1735 году для охраны и обслуживания Ладожского канала. Павильон просуществовал до середины 1930-х годов, после чего его дальнейшая судьба, как и судьба ботика Петра I и катера Александра II, остается неизвестной. Предложения по воссозданию объекта были выполнены на основе исторических материалов Центрального государственного исторического архива и Центрального государственного архива кинофотофонодокументов Санкт-Петербурга (рис. 12).

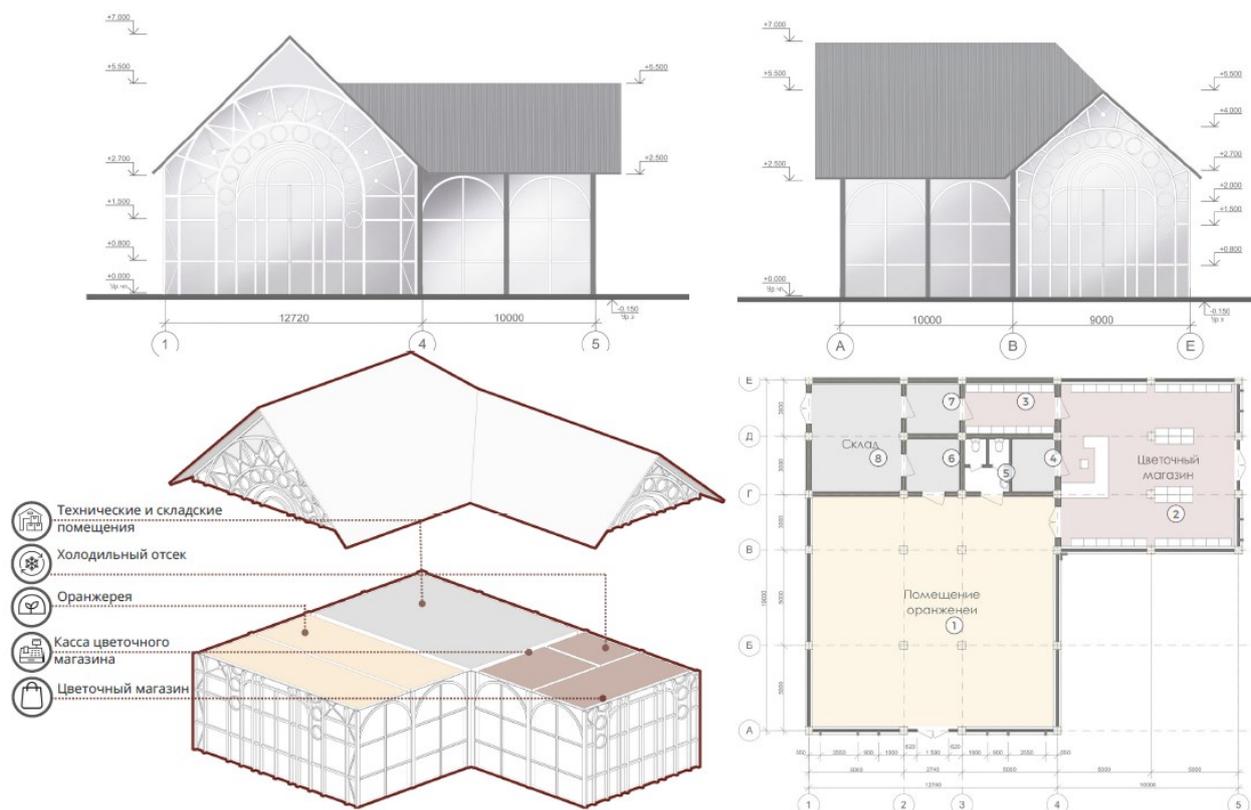


Рис. 13. Предложение по приспособлению павильона ботинок Петра 1.
Сост. Кислухина С.С., рук. Перькова М.В., Ладик Е.И.

Выводы. Возведение Староладожского канала сформировало поселения и дало импульс градостроительному развитию городов Шлиссельбург и Новая Ладога, повлияло на появление объектов культурного наследия. В результате исследования историко-графических материалов выявлены пять этапов строительства и функционирования канала: 1 этап строительства и частичной эксплуатации (1718–1730 гг.); 2 этап реконструкции и расширения (1760–1820-е гг.); 3 этап интенсивной эксплуатации и развития (1830-е – 1880 гг.); 4 этап упадка и частичной консервации (1880-е – 1960 гг.); 5 этап с 1980 г. по настоящее время.

Выявлена градообразующая роль канала на развитие прилегающих территорий, формирование городов и поселений, расположенных вдоль Староладожского канала и их планировочные особенности:

- 1) основной градостроительной осью в городах Шлиссельбург Новая Ладога являлся Староладожский канал;
- 2) основная часть исторической застройки рассматриваемых городов расположена в районе шлюзов Староладожского канала или вытянута вдоль него;
- 3) промышленность в городах представлена судоремонтными предприятиями, расположившимися на водных артериях.

Во время Великой Отечественной войны был утерян ряд исторических объектов. В настоящее время Староладожский канал находится в неудовлетворительном состоянии.

В ходе исследования был проанализирован культурно-туристический потенциал территорий малых городов и поселений вдоль Староладожского канала, выявлены потенциальные опорные центры развития туризма. В качестве крупных опорных центров туризма выступают города Шлиссельбург и Новая Ладога. Основным перспективным направлением развития территорий является возрождение движения по Староладожскому каналу путем организации водно-туристических маршрутов, которые берут свое начало в г. Санкт-Петербург по на реке Неве до города Шлиссельбург и далее по каналу через деревни Дубно, Кабона, Лаврово в Новую Ладогу. Организация водного маршрута включает в себя три этапа: на первом этапе – восстановление функционирования Староладожского канала в границах города Шлиссельбург; на втором этапе – проведение работ по восстановлению канала в границах города Новая Ладога; на третьем этапе – организация территорий вдоль береговой линии в деревнях Лаврово, Кабона и Дубно. Развитие туристических территорий будет способствовать привлечению инвестиций и повышению культурной значимости региона и станет важным стимулом в экономическом развитии территории.

В качестве направлений перспективного развития населенных пунктов, расположенных близ Староладожского канала, следует выделить следующие:

- создание дополнительных точек притяжения туристов всесезонного характера, формирование общественных пространств и мест проведения событийных мероприятий;
- развитие существующего туристического маршрута в г. Шлиссельбург и интеграция Староладожского канала в его инфраструктуру;
- модернизация рекреационных зон, благоустройство и повышение растительного разнообразия;
- восстановление объектов культурного наследия и их приспособление под современные функции с целью сохранения;
- разработка дизайн-кода и предложений по его применению с целью сохранения идентичности исторических населенных пунктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лутченко С.И. Территориально-планировочная организация туристской инфраструктуры Ленинградской области: дис. канд. арх наук: 2.1.13. Санкт-Петербург, 2023. 266 с.
2. Кислухина С.С., Осипов Л.А. Особенности освоения территорий при строительстве Староладожского канала в Ленинградской области. // Сборник материалов Всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ». СПб. 2024. С. 3–9.
3. Снытко В.А., Широкова В.А., Снытко В.А., Низовцев В.А., Нестеров Е.М., Фролова Н.Л., Дмитрук Н.Г., Чеснов В.М., Озерова Н.А. Ладожские каналы: Историко-научный обзор // Конференция: Тихвинская водная система: 300 лет создания, 200 лет от начала эксплуатации. Тихвин, 2011. [Электронный ресурс] https://www.researchgate.net/publication/327750942_Ladozskie_kanaly_istoriko-naucnyj_obzor (дата обращения: 27.07.2024)
4. О включении в перечень исторических поселений, имеющих особое значение для истории и культуры Ленинградской области, города Новая Ладога Ленинградской области: Приказ № 01-03/20-257: [принят Комитетом по культуре Ленинградской области 28.09.2020 г.]. СПб.: 2022. 218 с.
5. О включении в перечень исторических поселений, имеющих особое значение для истории и культуры Ленинградской области, города Шлиссельбург Ленинградской области: Приказ № 01-03/20-256: [принят Комитетом по культуре Ленинградской области 28 сентября 2020 года]. Санкт-Петербург: 2022. 93 с.
6. Бенда В.Н. Ладожский канал – крупнейшее гидротехническое сооружение Европы в первой половине XVIII в // XXI Царскосельские чтения: материалы международной научной конференции. Том I. СПб.: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2017. С. 17–25.
7. Клименко С.В. Гидротехнические проекты Б.К. фон Миниха и их местов русском градостроительстве 1720-1730-х годов // Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: Материалы международной научно-практической конференции. Сборник статей. М: Московский архитектурный институт (государственная академия), 2012. С. 44–49.
8. Николаев А.С., Житков С.М. Краткий исторический очерк развития водяных и сухопутных сообщений и торговых портов в России. Санкт-Петербург: типография Министерства путей сообщения, 1900. 372 с.
9. Перькова М.В., Ладик Е.И. Реновация городской среды исторического центра г. Новая Ладога // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14. № 1. С. 178–190. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.21
10. Цыденова И.Б., Семенцов С.В. Проектное предложение по реставрации и приспособлению административного центра Новой Ладоги // Архитектурные сезоны в СПбГАСУ: сб. материалов XI Регионального творческого форума с международным участием. Санкт-Петербург, 2021. С. 158–159.
11. Ельникова Е.И., Акулова Н.А. Проблемы возрождения паломнического центра Новой Ладоги // Архитектурные сезоны в СПбГАСУ: сб. материалов XI Регионального творческого форума с международным участием. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2021. С.109–111.
12. Государственные архивы Санкт-Петербурга // Архивы Санкт-Петербурга: официальный сайт – Санкт-Петербург. [Электронный ресурс] URL: <https://spbarchives.ru/archives> (дата обращения: 19.03.2024).
13. Планы городов // Геопортал Русского географического общества: официальный сайт. [Электронный ресурс] URL: <https://geoportal.rgo.ru/catalog/starinnye-atlasy-i-karty/plany-i-gerby-gorodov/plany-gorodov> (дата обращения: 05.05.2024).
14. Арслан М.И., Ладик Е.И. Особенности формирования и развития архитектурной среды малых исторических городов Белгородской области (на примере г. Валуйки) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 31–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-31-42
15. Лутченко С.И., Корня Е.А. Дизайн-код как культурный параметр для сохранения исторического наследия в местах активного развития

туризма и рекреации // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12. № 3(48). С. 154–162.

16. Кислухина С.С., Ладик Е.И. Анализ туристического потенциала территорий вдоль Старолadoжского канала на примере г. Шлиссельбург // Сборник материалов Всероссийской конференции «Неделя науки ИСИ», СПб. 2023. С. 164–166.

17. Комитет по культуре Ленинградской области: Серебряное ожерелье Ленинградской области: культурно познавательные маршруты региона. Сборник материалов краеведческой конференции 26 апреля 2018 года / Ленинградская

областная универсальная научная библиотека. Санкт-Петербург, 2019. 144 с.

18. Перькова М. В. Пространственное развитие исторического города Новая Ладога Ленинградской области // Архитектура и строительство России. 2023. № 3(247). С. 56–59.

19. Мурашова Н.В., Мыслина Л.П. Дворянские усадьбы Санкт-Петербургской губернии. Южное Приладожье: Волховский и Кировский районы. СПб, «Алаборг», 2009. 19 с.

Информация об авторах

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

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

Чернышева Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Поступила 27.07.2024 г.

© Ладик Е.И., Перькова М.В., Чернышева Н.В., 2024

**Ladik E.I., Perkova M.V., Chernysheva N.V.*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

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

FEATURES OF URBAN DEVELOPMENT OF TERRITORIES ALONG THE STAROLADOJSKIY CANAL OF THE LENINGRAD REGION

Abstract. *The article examines the stages of construction of the Staroladojskiy canal and urban development of the adjacent territories, as well as the features of the architectural and planning structure of the cities of Shlisselburg and Novaya Ladoga. A retrospective analysis of the architectural and planning formation of the cities of Shlisselburg and Novaya Ladoga was carried out, the features of their architectural environment were identified, the current state of cultural heritage objects was analyzed, and objects in need of restoration and adaptation for modern use were identified. Modern urban planning problems in settlements near the Staroladojskiy canal have been identified, including: pollution of water bodies, swamping of the canal bed, leading to its degradation; destruction of cultural heritage sites, lack of identity of the water façade, the presence of dissonant buildings, etc. An assessment of the historical and cultural potential of the territories along the coastline of the Staroladojskiy canal was carried out and potential support centers for cultural and educational tourism of various levels were identified, the key among which are the cities of Shlisselburg and the city. Novaya Ladoga, as well as the village of Kobona. The directions for the future development of the territories of the cities of Novaya Ladoga and Shlisselburg have been determined. Promising directions for the reorganization of the historical center of Shlisselburg are considered. A proposal has been developed for organizing water tourism routes along the Staroladojskiy canal with the accompanying development of tourism infrastructure.*

Ключевые слова: *Staroladojskiy canal, cultural heritage sites, historical cities, architectural and engineering objects*

REFERENCES

1. Lutchenko S.I. Territorial'no-planirovochnaja organizacija turistskoj infrastruktury

Leningradskoj oblasti. Cand, Diss. [Territorial and planning organization of tourist infrastructure of

Leningrad region. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2023. 266 p. (rus)

2. Kislukhina S.S., Osipov L.A. Features of the development of territories during the construction of the Staroladojskiy canal in the Leningrad Region [Osobennosti osvoeniya territorij pri stroitel'stve Staroladozhskogo kanala v Leningradskoj oblasti]. Collection of materials of the All-Russian conference "Science Week ISI". St. Petersburg 2024. Pp. 3–9. (rus)

3. Snytko V.A., Shirokova V.A., Snytko V.A., Nizovtsev V.A., Nesterov E.M., Frolova N.L., Dmitruk N.G., Chesnov V.M., Ozerova N.A. Ladoga canals: Historical and scientific review [Ladozhskie kanaly: Istoriko-nauchnyj obzor]. Conference: Tikhvin water system: 300 years of creation, 200 years from the start of operation. Tikhvin, 2011. https://www.researchgate.net/publication/327750942_Ladozhskie_kanaly_istoriko-nauchnyj_obzor (date of treatment: 27.07.2024)

4. On inclusion in the list of historical settlements of particular importance for the history and culture of the Leningrad Region, the city of Novaya Ladoga, Leningrad Region: Order No. 01-03/20-257: [Adopted by the Committee on Culture of the Leningrad Region on September 28, 2020]. St. Petersburg: 2022. 218 p. (rus)

5. On inclusion in the list of historical settlements of particular importance for the history and culture of the Leningrad Region, the city of Shlisselburg, Leningrad Region: Order No. 01-03/20-256: [Adopted by the Committee on Culture of the Leningrad Region on September 28, 2020]. St. Petersburg: 2022. 93 p. (rus)

6. Benda V.N. The Ladoga Canal is the largest hydraulic structure in Europe in the first half of the 18th century [Ladozhskij kanal – krupnejshee gidrotekhnicheskoe sooruzhenie Evropy v pervoj polovine XVIII v.]. XXI Tsarskoye Selo readings: materials of the international scientific conference. Volume I. St. Petersburg: LSU named after. A.S. Pushkina, 2017. Pp. 17–25. (rus)

7. Klimenko S.V. Hydraulic projects B.K. von Minich and their places in Russian urban planning of the 1720-1730s [Gidrotekhnicheskie proekty B.K. fon Miniha i ih mestov russkom gradostroitel'stve 1720-1730-h godov]. Science, education and experimental design. Proceedings of the Moscow Architectural Institute: Materials of the international scientific and practical conference. Digest of articles. M: Moscow Architectural Institute (state academy), 2012. Pp. 44–49. (rus)

8. Nikolaev A.S., Zhitkov S.M. A brief historical outline of the development of water and land communications and trade ports in Russia [Kratkij istoricheskij ocherk razvitiya vodyanyh i suhoputnyh

soobshchenij i torgovyh portov v Rossii]. St. Petersburg: printing house of the Ministry of Railways, 1900. 372 p. (rus)

9. Perkova M.V., Ladik E.I. Renovation of the urban environment of the historical center of Novaya Ladoga [Renovaciya gorodskoj sredy istoricheskogo centra g. Novaya Ladoga]. Urban planning and architecture. 2024. Vol. 14. No. 1. Pp. 178–190. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.21 (rus)

10. Tsydenova I.B., Sementsov S.V. Project proposal for restoration and adaptation of the administrative center of Novaya Ladoga. Arhitekturnye sezony v SPbGASU: sb. materialov XI Regional'nogo tvorcheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem [Architectural seasons in SPbGASU: Sat. materials of the XI Regional Creative Forum with international participation]. St. Petersburg, 2021. Pp. 158–159. (rus)

11. Yelnikova E.I., Akulova N.A. Problems of revival of the pilgrimage center of New Ladoga. Arhitekturnye sezony v SPbGASU: sb. materialov XI Regional'nogo tvorcheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem [Architectural seasons in SPbGASU: Sat. materials of the XI Regional Creative Forum with international participation]. St. Petersburg, 2021. Pp. 109–111. (rus)

12. State Archives of St. Petersburg. Archives of St. Petersburg: official website. St. Petersburg. URL: <https://spbarchives.ru/archives> (date of treatment: 03.19.2024).

13. City plans // Geoportals of the Russian Geographical Society: official website. URL: <https://geoportals.rgo.ru/catalog/starinnye-atlasy-i-karty/plany-i-gerby-gorodov/plany-gorodov> (date of treatment: 03.19.2024).

14. Arslan M.I., Ladik E.I. Features of the formation and development of the architectural environment of small historical cities of the Belgorod region (on the example of the city of Valuika) [Osobennosti formirovaniya i razvitiya arhitekturnoj sredy malyh istoricheskikh gorodov Belgorodskoj oblasti (na primere g. Valujki)]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhova. 2023. No. 9. Pp. 31–42. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-31-42 (rus)

15. Lutchenko S.I., Kornya E.A. Design code as a cultural parameter for preserving historical heritage in places of active development of tourism and recreation [Dizajn-kod kak kul'turnyj parametr dlya sohraneniya istoricheskogo naslediya v mestah aktivnogo razvitiya turizma i rekreacii]. Urban planning and architecture. 2022. Vol. 12. No. 3(48). Pp. 154–162. (rus)

16. Kislukhina S.S., Ladik E.I. Analysis of the tourism potential of territories along the Staraya Ladoga Canal using the example of the city of Shlisselburg [Analiz turisticheskogo potenciala territorij

vdol' Staroladozhskogo kanala na primere g. Shlissel'burg]. Collection of materials of the All-Russian conference «Science Week ISI», St. Petersburg. 2023. Pp. 164–166. (rus)

17. Committee for Culture of the Leningrad Region: Silver necklace of the Leningrad region: cultural educational routes of the region. Collection of materials from the local history conference on April 26, 2018. Leningrad Regional Universal Scientific Library. St. Petersburg, 2019. 144 p. (rus)

18. Perkova M.V. Spatial development of the historical city of Novaya Ladoga, Leningrad region

[Prostranstvennoe razvitie istoricheskogo goroda Novaya Ladoga Leningradskoj oblasti]. Architecture and construction of Russia. 2023. No. 3(247). Pp. 56–59. (rus)

19. Murashova N.V., Myslina L.P. Noble estates of the St. Petersburg province. Southern Ladoga region: Volkhov and Kirov regions [Dvoryanskie usad'by Sankt-Peterburgskoj gubernii. Yuzhnoe Priladozh'e: Volhovskij i Kirovskij rajony]. St. Petersburg, "Alaborg", 2009. 19 p. (rus)

Information about the authors

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

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

Chernysheva, Natalya V. Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: chernysheva56@rambler.ru. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29.

Received 24.07.2024

Для цитирования:

Ладик Е.И., Перькова М.В., Чернышева Н.В. Особенности градостроительного освоения территорий вдоль Старолadoжского канала Ленинградской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 56–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-56-70

For citation:

Ladik E.I., Perkova M.V., Chernysheva N.V. Features of urban development of territories along the Staroladojskiy canal of the Leningrad region. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 56–70. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-56-70

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-71-80

Головко Д.А.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова
E-mail: dima.golovko.9898@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАСКЛИНИВАЮЩИХ АГЕНТОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ БУРОВЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. В статье рассмотрены основные направления исследований в области технологии алюмосиликатных материалов. Установлен новый тип материалов, применяемых при получении пропантов – отходы обогащения руд. В наше время достаточно много научных коллективов занимаются разработками в синтезе пропантов. Рассмотрены наиболее выделяющиеся научные коллективы мира. Показано, что лидером в исследованиях этого типа материалов является Китай. В настоящий момент получены положительные результаты по использованию отходов обогащения фосфатных пород, железа, титана, германия, свинцово-цинковых руд. Описаны основные положения исследований, сделан вывод о перспективности применения данного типа материалов в технологии алюмосиликатных пропантов, особенно для регионов с развитой добывающей промышленностью. Преобладающими оксидами являются Al_2O_3 и SiO_2 . Это заключается в том, что оксид алюминия оказывает непосредственное влияние на прочностные характеристики, а оксид кремния – на пластичность сырьевой смеси, необходимую при формовании гранул пропанта. Тем не менее, повышение доли Al_2O_3 до 96,0 мас. % приводит к возникновению хрупкости у пропантов из-за их прочной оболочки и пустотелого центра. Эти характеристики ограничивают их применение в процессе нефтедобычи. В ходе исследования был выбран буровой илам, полученный на Западно-Варавенском месторождении, которое находится в Славянском районе Краснодарского края, всего в 3,5 км от хутора Мостовянский.

Ключевые слова: нефтедобыча, пропант, фторид натрия, модифицирующая добавка, буровой илам, спекание.

Введение. В современном мире наблюдается рост интереса к разработке нефтяных месторождений с малой глубиной залегания, до 3500 метров. В этой связи активно используется метод гидравлического разрыва пласта, который подразумевает поэтапное увеличение давления в жидкости до тех пор, пока не образуются трещины в пласте. Этот метод позволяет повысить выход нефти и улучшить эксплуатационные характеристики скважин.

Для успешной реализации гидроразрыва применяются разные виды жидкостей, включая водные полимерные растворы, эмульсии и загущенные углеводороды, такие как дизельное топливо и сырая нефть. После формирования трещин, для их стабилизации используется расклинивающий материал, преимущественно кварцевый песок или пропанты.

Пропанты, которые представляют собой прочные гранулы из глинозема и кремнезема, обеспечивают всю необходимую устойчивость к высоким температурам и давлениям. Они играют ключевую роль в поддержании целостности пласта. Пропанты могут быть использованы отдельно или в комбинации с другими материалами для оптимизации процесса добычи нефти и в других отраслях, таких как горнодобывающая промышленность.

Кроме того, важной частью процесса гидравлического разрыва является контроль за экстракцией пропантов и их эффективностью в образовавшихся трещинах. Специальные методы мониторинга, такие как сейсмическая томография, позволяют отслеживать геометрические параметры трещин и динамику процесса извлечения углеводородов. Это важно для оценки успешности проведенных операций и дальнейшего улучшения технологий.

Современные технологии также включают в себя использование цифровых двойников, что позволяет моделировать и прогнозировать поведение пласта под воздействием различных факторов, включая давление и параметры жидкости. Такой подход способствует более рациональному расходованию ресурсов и минимизации воздействия на окружающую среду.

В условиях нарастающей конкуренции и требований к устойчивому развитию внимание к вопросам экологии становится всё более важным. Инновационные методы, такие как использование биоразлагаемых жидкостей и пропантов, а также технологии рекуперации и очистки, могут значительно снизить негативное воздействие на экосистему и повысить социальную ответственность компаний в этой сфере.

Как известно, пропанты представляют собой гранулообразный материал (диаметр гранул 0,5–

1,2 мм), применяемый в технологии гидроразрыва пласта для повышения эффективности нефтеотдачи скважин. Традиционные пропанты синтезируются с использованием природных сырьевых материалов (глинозема и кремнезема), вносящих в химический состав оксиды кремния и алюминия.

Таблица 1

Химический состав традиционных пропантов

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Пропант	50,0–65,0	15,0–45,0	4,5–5,0	4,5–5,0

Как видно из таблицы, преобладающими оксидами являются Al₂O₃ и SiO₂. Это заключается в том, что оксид алюминия оказывает непосредственное влияние на прочностные характеристики, а оксид кремния – на пластичность сырьевой смеси, необходимую при формовании гранул пропанта. Однако, увеличение содержания Al₂O₃ до 96,0 мас. % приводит к тому, что гранулы пропанта получаются довольно хрупкими, так как они имеют прочную оболочку и полую сердцевину. Эти факторы ограничивают их использование при нефтедобыче [1–3].

Однако, запасы природных сырьевых материалов постепенно истощаются, в связи с этим в мире проводятся исследования о возможности использования различных модифицирующих добавок в компонентный состав сырьевой смеси пропанта, которые будут способствовать не только снижению использования природного сырья, но и повышению физико-механических характеристик получаемого материала. Одной из таких добавок научными коллективами был выбран буровой шлам, добавляемый в количестве 15–20 мас. % [3–5].

Буровой шлам представляет собой водную смесь, состоящую из бурового раствора и твердых инородных тел, таких как горные породы, фракции, возникающие при износе бурового оборудования, глинистые минералы и прочие отходы, возникающие в процессе бурения скважин. Такие шламы способны содержать опасные вещества, что может негативно сказаться на экосистеме. Поэтому переработка буровых отходов становится актуальной для их повторного использования в силикатной промышленности, в частности для производства высококачественных алюмосиликатных пропантов.

В ходе бурения образуется значительное количество бурового шлама, который требует адекватной обработки и утилизации. Неправильные методы обращения с буровыми шламами могут привести к опасному загрязнению почвы и водоемов.

С учетом растущего внимания к вопросам экологии, переработка буровых отходов становится насущной необходимостью. Она не только снижает негативное воздействие на природу, но и предоставляет ценные ресурсы для изготовления стройматериалов. Рециклинг бурового шлама в силикатной отрасли позволяет сократить затраты и снизить сырьевые расходы, способствуя при этом экологичности производственных процессов и устойчивому развитию. В наше время достаточно много научных коллективов занимаются разработками в синтезе пропантов. Далее рассмотрим наиболее выделяющиеся научные коллективы мира.

Научный коллектив Египетского научно-исследовательского института нефти (EPRI, Каир, Египет) занимается получением пропантов на основе местных сырьевых материалов: низкосортный коалин из района Красного моря, кварцевый песок из Эль-Заафараны, доломит из Джабаль Атака, известняк из Эль-Минии и ильменит из Абу-Галки. В исследовании рассмотрена возможность использования данного сырья для синтеза качественных пропантов. Полученные пропанты имеют прочность 7500 psi (51,71 МПа) при небольшой кажущейся плотности 2580 кг/м³ [6].

Коллектив Научно-исследовательского института энергетической безопасности (Уэльс, Великобритания) долгое время занимается получением пропантов на основе силикатно-кальциевого цемента. Основным сырьем служили: карбонат кальция марки ACS (CaCO₃), ортокремниевая кислота (Si(OH)₄) и коллоидальный диоксид кремния (SiO₂). В своих исследованиях научный коллектив получил пропанты высокой прочности и средней насыпной плотности. Образцы имели прочность 7900 psi (54,47 МПа) и плотность около 2700 кг/м³ [7].

Научный коллектив Варшавского технологического университета (Варшава, Польша) занимается синтезом пропантов на основе суглинистых материалов. В исследованиях было выяснено, что использование суглинистых материалов способствует получению качественных гранул пропанта. Проведенное исследование выявило пригодность применяемого сырья. Глинозем и диоксид кремния в качестве доминирующих соединений обеспечивали легкость образования гранул путем механического гранулирования, однако добавление винилакррила в качестве связующего улучшало уплотнение порошка во время диспергирования воды в минеральных частицах. Термогравиметрический анализ (ТГА) каолина, глины, боксита и полимера позволил предсказать их поведение из-за термического воздействия и установить медленную скорость

нагрева до 700 °С, чтобы избежать наличия внутренних напряжений в пропанте. ТГА также выявило 97 % разрушения связующего из-за термического воздействия 600 °С. Дальнейший обжиг не повлиял на стабильность полимера [8].

Коллектив ученых из Университета Гуанси (Гуанси, Китай) разрабатывает пропанты на основе неорганического полимера методом отверждения суспензий. Основным сырьем для получения таких пропантов были выбраны шлак и жидкое стекло. Объемная плотность и насыпная плотность составляли 1780 кг/м³ и 1240 кг/м³ соответственно, которые были ниже, чем плотности кварцевого песка (объемная плотность примерно 2650 кг/м³) и керамического пропанта (объемная плотность 2700-3600 кг/м³). Характеристика низкой плотности полезна для суспендирования пропанта в жидкости для гидроразрыва и его транспортировки в трещинах, а осаждение и блокирование пропанта в трещинах можно избежать во время процесса транспортировки. Наблюдая за округлостью и сферичностью опор и сравнивая со стандартными пластинами округлости и сферичности, было обнаружено, что округлость и сферичность были близки к 1. Высокая округлость и сферичность помогли улучшить проницаемость слоя пропанта и проводимость потока [9].

В Институте исследований энергетической безопасности (ESRI, Великобритания) много лет проводятся исследования по получению полимерных пропантов. Основным сырьем для данных пропантов служат карбоновые кислоты: 1,1-метилимидазол, эпоксирезинмарки DER-332, 2-пропанол, ацетон и карболит (размеры зерен ~ 1000 мкм). Образующиеся интеллектуальные частицы пропанта могут образовывать пористые иерархические структуры независимо от природы покрытия (будь то полимер или смола). Покрытый смолой пропант не будет сшит или полностью отвержден перед закачкой в нефтяную (газовую) скважину, чтобы пропант закачивался. Этим частицам требуется давление и повышенная высокая температура для сшивания на месте. Напротив, полимерное покрытие позволяет мост без физического контакта, а процесс сборки зависит от pH, в результате мостик будет разрушен при низких значениях pH, потому что мостик настолько же силен, насколько прочно взаимодействие между полимерными цепями (водородная связь) [10–13].

Коллектив Университета науки и техники (Сиань, Китай) занимается возможностью использования золы-уноса в получении керамических пропантов, обладающих низкой плотностью и высокой прочностью, на основе муллита. Про-

панты, полученные в этом исследовании, состояли только из муллита в качестве преобладающей кристаллической фазы. В то время как другие распространенные пропанты, приготовленные из боксита, почти состояли только из муллита и корунда или корунда. Таким образом, в отличие от большинства керамических пропантов на китайском рынке и CarboCompanu, плотность которых составляет 2800–3400 кг/м³, низкая кажущаяся плотность пропантов, полученных из летучей золы, составляла 2610 кг/м³ [14].

Научный коллектив Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, Россия) под руководством Г.А. Адилова долгое время ведет работы по изучению возможности синтеза магнезиально-кварцевых пропантов на основе шлаков доменного производства с добавками не дефицитного сырья – кварцита и магнезита. Образцы имели прочность 86,1 МПа [15–16].

Перечисленные выше научные коллективы в основном рассматривают конкретные технологии применения отходов бурения для керамических пропантов, с целью улучшения их свойств, но не рассматривают применение буровых шламов в качестве основного сырья для синтеза пропанта.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования был выбран буровой шлам, добытый в Западно-Варавенском месторождении, находящемся в Славянском районе Краснодарского края, в трех с половиной километрах от хутора Мостовянский. Анализ химического состава бурового шлама проводился для выявления концентрации оксидов, образующих породы, и некоторых микроэлементов. Для этого использовался метод рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА) на вакуумном спектрометре модели PW2400 компании Philips Analytical (Нидерланды). Прибор оборудован рентгеновской трубкой мощностью 3 кВт с Rh-анодом, с максимальным напряжением 60 кВ и анодным током до 125 мА. Калибровка выполнялась с использованием стандартизированных образцов горных пород и донных отложений.

Фазовый состав анализировался после измельчения образца шлама с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific) в ЦКП «Нанотехнологии» Южно-Российского политехнического университета. Данные интерпретировались с помощью базы ICDD.

При подготовке лабораторных образцов шлам высушивался (100±5) °С и дробился до 250 мкм. После смешивания с 5% водой образцы формировались в кубики размером 20 мм методом прессования при 5 МПа и обжигались в му-

фельной печи при 1100 °С. Образцы выдерживались при максимальной температуре в течение 30 минут, а затем оставались в печи до полного остывания перед дальнейшими испытаниями. Образцы после обжига замерялись с использованием штангенциркуля и лабораторных весов для определения плотности после спекания ρ , кг/м³, по формуле (1):

$$\rho = (m/V) \cdot 1000, \quad (1)$$

где V – объем образца после обжига, см³; m – масса образца после обжига, г.

Прочностные характеристики определялись с использованием испытательного пресса марки ТП-1-1500 с диапазоном измерения силы от 30 до 1500 кН. Расчет прочности R , МПа, проводился по формуле (2):

$$R = P \cdot 10^3 / S, \quad (2)$$

где P – нагрузка при раздавливании, кН; S – площадь поперечного сечения, на которое действует нагрузка, м².

Коэффициент спекания K , показывающий качество проведенного обжига и определялся по формуле (3):

$$K = V_1 / V_2, \quad (3)$$

где V_1 – объем образца до обжига, см³; V_2 – объем образца после обжига, см³.

Если значение коэффициента спекания больше 1, то образец можно считать спекшимся. Если же меньше 1, то образец в процессе обжига вспенился.

Основная часть. В ходе определения химического состава по методике, описанной выше, были получены следующие данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав бурового шлама

Оксиды	Содержание, масс. %	Оксиды	Содержание, масс. %
ППП	9,67	MnO	0,05
Na ₂ O	1,65	Fe ₂ O ₃	3,91
MgO	1,67	P ₂ O ₅	0,10
Al ₂ O ₃	10,26	SO ₃	2,07
SiO ₂	62,14	Cl	0,25
K ₂ O	1,48	SrO	0,03
CaO	4,35	BaO	1,83
TiO ₂	0,54		

По данным таблицы 2 видно, что выбранный буровой шлам обладает недостаточным количеством важного для пропанта оксида алюминия (табл. 1), следовательно, при разработке сырьевых смесей необходимо учитывать также ввод дополнительных модифицирующих добавок.

Результаты определения фазового состава бурового шлама Западно-Варавенского месторождения представлены на рисунке 1.

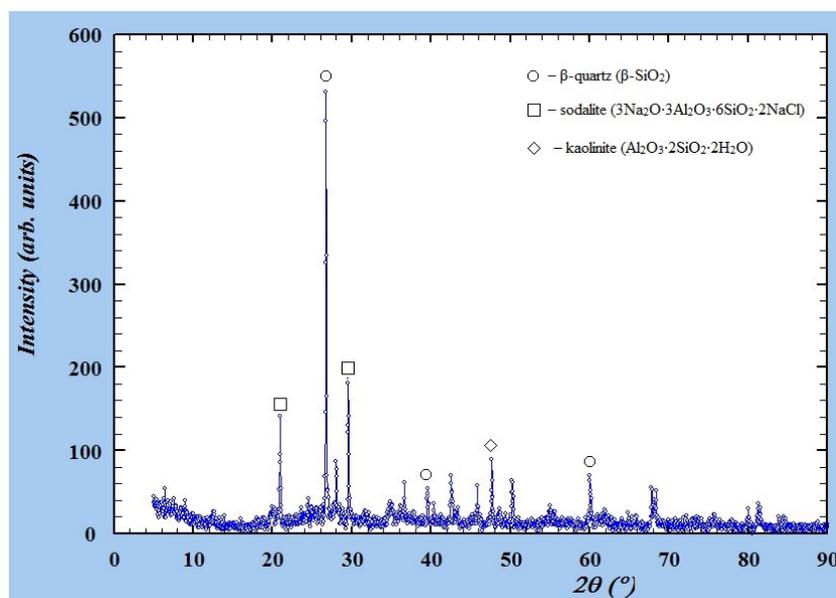


Рис. 1. Порошковая дифрактограмма бурового шлама Западно-Варавенского месторождения

Как видно из рисунка 1, основной фазой в исследуемом буровом шламе является α -кварц (α - SiO_2), находящийся в количестве около 25–30 %. Другими же фазами являются каолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и содалит ($3\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{NaCl}$). Наличие данных фаз в составе бурового шлама говорит о возможности его использования при синтезе пропантов. Исследование состава бурового шлама, богатого β -кварцем, каолинитом и содалитом, открывает новые горизонты для его применения в промышленности. β -Кварц, обладая высокой термостойкостью и механической прочностью, может служить качественным наполнителем и идет в основу синтеза пропантов, используемых в гидравлическом разрыве пласта. Это позволяет улучшить эффективность добычи углеводородов, увеличивая проходимость трещин.

Каолинит, в свою очередь, характеризуется пластичностью и адгезионными свойствами, что делает его ценным компонентом для создания композитных материалов и улучшения свойств буровых растворов. Его присутствие в шламе открывает возможности для переработки в бентонитовые добавки, которые могут повысить устойчивость буровых растворов в сложных геологических условиях.

Содалит, обладая уникальными сорбционными свойствами, может быть использован для очистки сточных вод и удаления тяжелых металлов, что также подчеркивает многофункциональность исследуемого бурового шлама. Таким образом, использование этих минералов в синтезе пропантов и других продуктах способствует устойчивой переработке ресурсов и повышению эффективности добычи [17–20].

На основании полученных результатов было решено вводить в состав сырьевой смеси порошок очищенного оксида алюминия. Получаемая смесь является тугоплавкой, следовательно, для полноценного протекания реакций спекания требуется ввод плавня – фторида натрия.

Для достижения оптимальных свойств конечного продукта, необходимо тщательно рассмотреть соотношение компонентов сырьевой смеси. Ввод порошка очищенного оксида алюминия в комбинации с буровым шламом и стеклобоем обеспечит достаточный уровень алюминия для синтеза стабильных алюмосиликатных пропантов. Важно провести предварительные испытания, чтобы определить идеальное содержание каждого из компонентов и их влияние на структурные характеристики готового пропанта.

Фторид натрия, как плавень, не только снижает температуру спекания, но и способствует улучшению однородности структуры получаемого материала. При этом следует обратить внимание на его количество, чтобы избежать излишней реакционной активности, которая может привести к ухудшению механических свойств готового продукта. Также стоит учесть влияние температуры и времени спекания на конечные характеристики алюмосиликатов.

Таким образом, создание высококачественных алюмосиликатных пропантов требует комплексного подхода, включая анализ компонентного состава, выбор оптимальных пропорций и методов спекания. Результат должен соответствовать современным требованиям нефтегазовой отрасли по прочности и пористости пропантов, что существенно повлияет на эффективность добычи и эксплуатационные условия в бурении.

В связи с этим были составлены следующие сырьевые смеси, представленные в таблице 3.

По технологии описанной выше были получены образцы, представленные на рисунке 2.

Таблица 3

Компонентные составы сырьевых смесей

№ состава	Содержание, мас. %			
	Буровой шлам	Стеклобой БТ-1	Порошок Al_2O_3	$\text{NaF}_{\text{сухой}}$
1	73,05	18,25	4,57	4,1
2	73,39	18,34	4,59	3,68
3	73,63	18,38	4,63	3,21
4	74,07	18,51	4,65	2,77

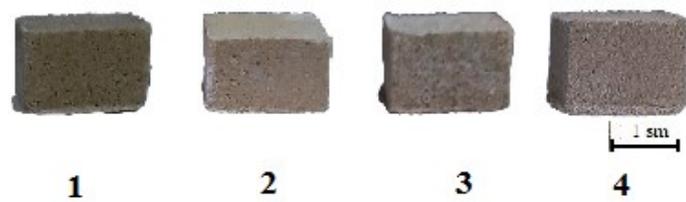


Рис. 2. Внешний вид обожженных образцов

Визуальный анализ показал, что все образцы каждого состава получились достаточно спеченными. На поверхности каждого образца заметна

небольшая стекловидная пленка, которая образуется в результате плавления стеклобоя. Каждый образец имеет незначительную оплавленность,

которая появляется за счет добавления второго важного плавня – фторида натрия.

Данные характеристики свидетельствуют о том, что выбранные составы эффективно смешивают составные компоненты, обеспечивая достаточное плавление и спекание. Стекловидная пленка на поверхности образцов указывает на успешное внедрение стеклобоя, что может способствовать улучшению механических и оптических свойств конечного материала. Плавление стеклобоя также позволяет создать более однородную структуру, что особенно важно для применения в высокодисперсных системах.

Фторид натрия, выступая в роли второго плавня, существенно снижает температуру плавления,

что позволяет осуществлять процесс спекания при более низких температурах. Это может улучшить сохранение свойств исходных материалов и снизить энергозатраты на производство. Тем не менее, необходимо учитывать воздействие фторидов на токсичность и безопасность процесса, что требует соответствующих мер предосторожности.

По формулам, приведенным выше, были определены основные характеристики полученных образцов пропантов, приведенные в таблице 4.

Зависимость изменения предела прочности при сжатии от состава сырьевой смеси показана на рисунке 3.

Таблица 4

Характеристики синтезированных образцов

№ состава	Характеристика		
	Плотность, кг/м ³ расчетная	Коэффициент спекания	Предел прочности при сжатии, МПа
1	1406	0,98	45
2	1848	1,07	73
3	1840	1,08	66
4	1800	1,07	57

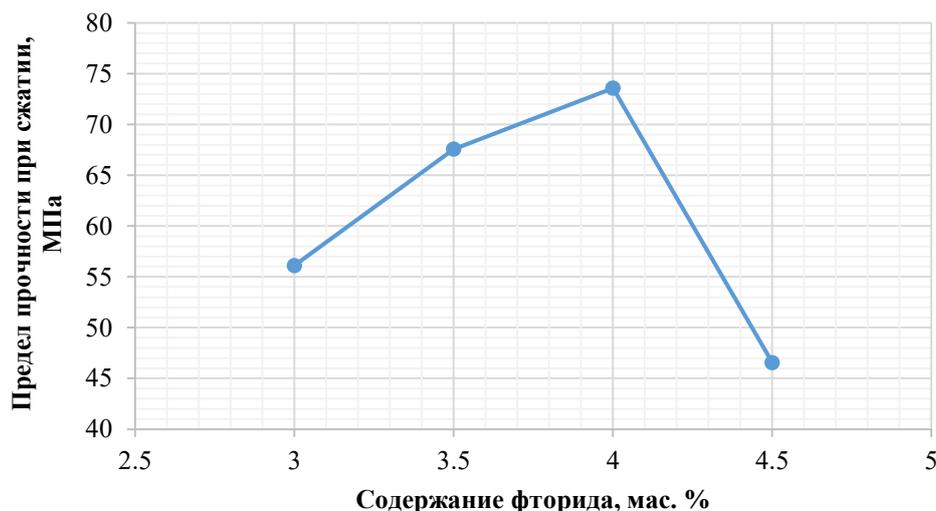


Рис. 3. Зависимость плотности и прочности от состава сырьевой смеси

Из рисунка 3 видно, что увеличение количества упрочняющей добавки приводит к значительному увеличению прочности. Однако при добавлении 4,5 мас. % NaF следует резкое снижение прочности почти в полтора раза. Это связано с тем, что в процессе обжига при указанных условиях наблюдается увеличение объема, выделяемого фтороводорода, что приводит к повышению пористости. Пористость, в свою очередь, оказывает значительное влияние на прочность готового материала. Это предположение полностью подтверждается данными из таблицы 4, где видно, что образец с плотностью 1406 кг/м³ и ко-

эффициентом спекания 0,98 оказался вспененным, а значит, обладает низкой прочностью на сжатие.

Стеклобой является одной из самых популярных добавок, изменяющих свойства в производстве силикатных материалов. В диапазоне температур от 580 до 740 °С, стеклобой находится в состоянии плавления, что улучшает спекание частиц. При увеличении температуры стекло поддается деформации из-за своей высокой вязкости, перемещая ионные ассоциаты и образуя кремнекислородные связи, что ускоряет спекание компонентов сырьевой смеси. Добавление стеклобоя необходимо при использовании с

оксидом алюминия, который увеличивает температуру спекания из-за своей тугоплавкости [21–23].

Фторид натрия выступает в роли флюса для силикатной массы, благодаря своей способности деполимеризовать силикатный каркас и образовывать фторкремнекислородные группы, что позволяет снизить температуру спекания на примерно 100 °С. В процессе спекания ковалентные связи кремнекислорода разрушаются, а ионы модификаторов частично заменяют кремний, образуя расплав с микрообластями, насыщенными катионами, что уменьшает вязкость [24].

Таким образом, использование небольших количеств фторидов в сырьевой смеси позволяет оптимизировать процесс спекания и улучшить механические свойства конечного материала, обеспечивая более равномерное распределение катионов в матрице расплава. Кроме того, низкие концентрации фторидов могут увеличить термостойкость материалов, поскольку снижается вероятность образования структурных дефектов, возникающих в процессе спекания. Это также позволяет улучшить адгезионные свойства и стабильность силикатных композиций, что особенно важно для применения в строительной индустрии и производстве керамики.

Необходимо отметить, что при повышении содержания фторидов стоит помнить о возможных отрицательных эффектах, таких как коррозия и снижение устойчивости к химическим воздействиям. Поэтому контроль за концентрацией фторидов является критически важным аспектом в разработке новых силикатных материалов с заданными свойствами. Устойчивое использование фторидов в комбинации с другими модификаторами позволит расширить горизонты применения силикатных композиций [25].

Выводы. Недостаточное содержание оксида алюминия в буровом шлеме Западно-Варавенского месторождения можно исправить вводом в шихту оксида алюминия, что позволит увеличить прочность синтезированных пропантов, но при этом повысится и температура. В связи с этим для создания композиций сырья необходимо добавлять разнообразные модификаторы, такие как плавни для уменьшения теплотрат и упрочняющие добавки для получения требуемых свойств соответствующих ГОСТУ Р 51761-2013.

Проведенные экспериментальные работы позволили разработать состав сырьевой смеси, позволяющий синтезировать алюмосиликатные пропанты соответствующие ГОСТ Р 51761-2013 «Алюмосиликатные пропанты. Технические требования» (68,9 МПа).

Разработан идеальный состав сырьевой смеси с учетом массовых долей: буровой шлам

занимает 73,39 %, стеклобой составляет 18,34 %, порошок оксида алюминия равен 4,59 %, а содержание фторида натрия составляет 3,68 %.

Описан выбор добавок, которые рекомендуются применять при создании сырьевых смесей пропантов. Установлено, что добавление алюминия способствует повышению температуры спекания. Однако для снижения этой температуры и ускорения процессов спекания следует использовать стеклобой и фторид натрия, выполняющие роль плавней и способствующие более эффективному спеканию частиц в силикатной смеси. Исследование показало, что оптимальной является концентрация добавки на уровне 4 % по массе, так как полученный продукт демонстрирует улучшенные показатели прочности и высокий коэффициент спекания.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках проекта «Вовлечение в хозяйственный оборот техногенных отходов, образующихся при бурении нефтегазовых скважин, с получением эффективных материалов, содержащих не менее 50 % буровых шламов в составе» при реализации программы развития ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова программы «Приоритет-2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудряшов С.И., Бачин С.И., Афанасьев И.С. Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2006. № 7. С. 80–83.
2. Жданов С.А. Опыт применения методов увеличения нефтеотдачи пластов в России // Нефтяное хозяйство. 2008. № 1. С. 58–61.
3. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Изд-во Летопись, 2005. 644 с.
4. Yatsenko E., Tretyak A., Chumakov A., Golovko D. Prospects for the use of drilling slurries for the synthesis of aluminosilicate propanants // Materials Today: Proceeding. 2021. Vol. 38. Pp. 1886–1888. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.575
5. Ионкин К.В., Крупский А.В. Оценка отходов переработки оловянной руды как источника загрязнения экосистем юга дальнего востока // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №1. С. 172–176.
6. Мигаль В.И., Скурухин В.И. Анализ критериев выбора пропантов // Нефтегазовая вертикаль. 2008. № 8. С. 74–78.
7. Миллер М., Дисмюк К. Гидравлический разрыв и создание капсулированных разрушителей // РХЖ. 2003. № 4 (т. XLVII). С.78–91.
8. Dusterhoft R.G., Chapman B. Fracturing high-permeability reservoirs increases productivity // Oil and Gas J. 1994. № 20. Pp. 40–44.

9. Шишлов О.Ф. Спрос на пропанты задается развитием технологии ГРП // Нефтегазовая вертикаль. 2008. № 8. С. 72–73.
10. Ab El-Kader M., Abdou M.I., Fadl A.M., Rabou A. Abd, Desouky O.A., M.F. El-Shahat. Novel light-weight glass-ceramic proppants based on frits for hydraulic fracturing process // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Pp. 1947–1953. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.09.173
11. Correia C., Wright K., Andreoli E., Almutairi Z., Sandnes B., Barron A. Hydration induced morphological change on proppant surfaces employing a calcium-silicate cement system // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. Vol. 537. Pp. 197–209. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.10.006
12. Szymanska J., Wisniewski P., Wawulska-Marek P., Mizera J. Determination of loamy resources impact on granulation of ceramic proppants and their properties // *Applied Clay Science*. 2018. Vol. 166. Pp. 327–338. DOI: 10.1016/j.clay.2018.09.032
13. Zhang K., Jiang H., Qin G. Utilization of zeolite as a potential multi-functional proppant for CO₂ enhanced shale gas recovery and CO₂ sequestration: A molecular simulation study on the competitive adsorption of CH₄ and CO₂ in zeolite and organic matter // *Fuel*. 2019. Vol. 249. Pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120312
14. Guo-hui Q., Si-jie X., Kaituo Y., Xue-min W. Study on the preparation of a free-sintered inorganic polymer-based proppant using the suspensions solidification method // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. Pp. 276–282.
15. Alexander S., Dunnill C., Barron A. Assembly of porous hierarchical copolymers/resin proppants: New approaches to smart proppant immobilization via molecular anchors // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 466. Pp. 275–283. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.12.038
16. Xiang J., Liu L., Cui X., Guangjian He Y. Effect of Fuller-fine sand on rheological, drying shrinkage, and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer grouting materials // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. 103381. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2019.103381
17. Tan J., Lu W., Huang Y., Wei S., Xuan X., Liu L., Zheng G. Preliminary study on compatibility of metakaolin-based geopolymer paste with plant fibers // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225. Pp. 772–775. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.142
18. Xiang J., Liu L., He Y., Zhang N., Cui X. Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to karst water // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 99. Pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.009
19. Wu X., Huo Z., Ren Q., Li H., Lin F., Wei Tengyue. Preparation and characterization of ceramic proppants with low density and high strength using fly ash // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 702. Pp. 442–448. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.262
20. Ren Q., Wei T., Wu X., Huo Z., Wang B. Influence of Eu³⁺ Doping on Luminescence Properties of Na₃Gd₂(BO₃)₃:Tb³⁺ and the Relevant Energy Transfer Mechanism // *Journal of Cleaner Production Cailiao Daobao/Materials Review*. 2017. Vol. 31(3). Pp. 7–10. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.06.002
21. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Решетова А.А. Критерии выбора глинистого сырья для получения алюмосиликатных пропантов // *Стекло и керамика*. 2009. № 9. С. 10–14.
22. Вакалова Т.В., Погребенков В.М., Верещагин В.И., Решетова А.А. Перспективы использования отечественного огнеупорного сырья в технологии керамических материалов для цветной металлургии и нефтегазодобывающей отрасли // *Новые огнеупоры*. 2009. № 4. С. 10–11.
23. Вакалова Т.В., Решетова А.А., Погребенков В.И., Верещагин В.И. Активация процесса синтеза муллита и спекания алюмосиликатной керамики на основе огнеупорного глинистого сырья // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2009. № 7-8. С. 74–80.
24. Вакалова Т.В., Решетова А.А., Ревва И.Б., Русинов П.Г., Баламыгин Д.И. Effect of thermochemical activation of clay raw materials on phase formation, microstructure and properties of aluminosilicate proppants // *Applied Clay Science*. 2019. Vol. 183. 105335. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105335
25. Adilov G.A., Povolotsky A.D., Zyryanov S.V., Roshchin V.E. Receiving Proppant from Metallurgical Slag for Petroleum Industry // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2018. Vol. 18 (1). Pp. 58–63. DOI:10.14529/met180108

Информация об авторах

Головко Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры общая химия и технология силикатов. E-mail: dima.golovko.9898@mail.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. Россия, 346407, Новочеркасск, улица Просвещения, д. 32.

Поступила 23.07.2024 г.

© Головко Д.А., 2024

Golovko D.A.

South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov

E-mail: dima.golovko.9898@mail.ru

THE EFFECT OF ADDITIVES ON THE STRENGTH PROPERTIES OF WEDGING AGENTS SYNTHESIZED ON THE BASIS OF DRILLING WASTE

Abstract. The article considers the main directions of research in the field of technology of aluminosilicate materials. A new type of materials used in the production of proppants has been established – ore dressing waste. Nowadays, quite a lot of research teams are engaged in developments in the synthesis of proppants. The most prominent scientific collectives of the world are considered. It is shown that China is the leader in the research of this type of materials. At the moment, positive results have been obtained on the use of waste from the enrichment of phosphate rocks, iron, titanium, germanium, and lead-zinc ores. The main provisions of the research are described, and a conclusion is made about the prospects of using this type of materials in the technology of aluminosilicate proppants, especially for regions with a developed mining industry. The predominant oxides are Al_2O_3 and SiO_2 . This lies in the fact that aluminum oxide has a direct effect on the strength characteristics, and silicon oxide on the plasticity of the raw material mixture, which is necessary for forming propane granules. Nevertheless, an increase in the proportion of Al_2O_3 to 96.0 wt. % leads to the appearance of fragility in proppants due to their strong shell and hollow center. These characteristics limit their use in the oil production process. During the study, drilling sludge obtained from the Zapadno-Varavenskoye field, which is located in the Slavyansky district of the Krasnodar Territory, just 3.5 km from the Mostovyansky farm, was selected.

Keywords: proppants, oil production, drilling sludge, disposal methods, recycling, environmental safety

REFERENCES

1. Kudryashov S.I., Bachin S.I., Afanas'ev I.S. Hydraulic fracturing as a method of developing low-permeability reservoirs [Gidrorazryv plasta kak sposob razrabotki nizkopronicaemyh kollektorov]. Neftyanoe hozyajstvo. 2006. No. 7. Pp. 80–83. (rus)
2. Zhdanov S.A. The experience of using methods to increase oil recovery in Russia [Opyt primeneniya metodov uvelicheniya nefteotdachi plastov v Rossii]. Neftyanoe hozyajstvo. 2008. No. 1. Pp. 58–61. (rus)
3. Ryazanov Ya.A. Enciklopediya po burovym rastvoram [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis Publishing House, 2005. 644 p. (rus)
4. Yatsenko E., Tretyak A., Chumakov A., Golovko D. Prospects of using drilling fluids for the synthesis of aluminosilicate proppants. Materials today: Collection of scientific papers. 2021. Vol. 38. Pp. 1886–1888. DOI: 10.1016/J.matpr.2020.08.575
5. Ionkin K.V., Krupskij A.V. Assessment of tin ore processing waste as a source of pollution of ecosystems in the south of the Far East [Ocenka othodov pererabotki olovyannoju rudy kak istochnika zagryazneniya ekosistem yuga dal'nego vostoka] Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2012. No. 1. Pp. 172–176. (rus)
6. Migal' V.I., Skuruhin V.I. Analysis of criteria for choosing proppants [Analiz kriteriev vybora proppantov] Neftgazovaya vertikal'. 2008. No. 8. Pp. 74–78. (rus)
7. Miller M., Dismyuk K. Theoretical section and the creation of encapsulated players [Gidravlicheskij razryv i sozdanie kapsulirovannyh razrushitelej]. RZh. 2003. No. 4 (vol. XLVII). Pp.78–91. (rus)
8. Dusterhoft R.G., Chapman B.J. Hydraulic fracturing of reservoirs with high permeability increases productivity. Oil and gas. 1994. No. 20. Pp. 40–44.
9. Shishlov O.F. The demand for proppants is set by the development of hydraulic fracturing technology [Spros na propanty zadaetsya razvitiem tekhnologii GRP]. Neftgazovaya vertikal'. 2008. No. 8. Pp. 72–73. (rus)
10. Ab El-Kader M., Abdu M.I., Fadl A.M., Rabu A. Abd, Desuki O.A., El-Shahat M.F. New lightweight glass-ceramic proppants based on frit for the hydraulic fracturing process. Ceramics International. 2020. Vol. 46. Pp. 1947–1953. DOI: 10.1016/J.ceramint.2019.09.173
11. Correias C., Wright K., Andreoli E., Almutairi Z., Sandnes B., Barron A. Hydration induced morphological change on proppant surfaces employing a calcium-silicate cement system. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 537. Pp. 197–209. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.10.006
12. Szymanska J., Wisniewski P., Wawulska-Marek P., Mizera J. Determination of loamy resources impact on granulation of ceramic proppants and their properties. Applied Clay Science. 2018. Vol. 166. Pp. 327–338. DOI: 10.1016/j.clay.2018.09.032
13. Zhang K., Jiang H., Qin G. Utilization of zeolite as a potential multi-functional proppant for CO_2 enhanced shale gas recovery and CO_2 sequestration: A molecular simulation study on the competitive ad-

sorption of CH₄ and CO₂ in zeolite and organic matter. *Fuel*. 2019. Vol. 249. Pp. 119–129. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120312

14. Guo-hui Q., Si-jie X., Kaituo Y., Xue-min W. Study on the preparation of a free-sintered inorganic polymer-based proppant using the suspensions solidification method. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. Pp. 276–282.

15. Alexander S., Dunnill C., Barron A. Assembly of porous hierarchical copolymers/resin proppants: New approaches to smart proppant immobilization via molecular anchors. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 466. Pp. 275–283. DOI: 10.1016/j.jcis.2015.12.038

16. Xiang J., Liu L., Cui X., Guangjian He Y. Effect of Fuller-fine sand on rheological, drying shrinkage, and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer grouting materials. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 104. 103381. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2019.103381

17. Tang J., Lu W., Huang Yu., Wei S., Xuan H., Liu L., Zheng G. Preliminary study of compatibility of geopolymer paste based on methacaolin with vegetable fibers. *Construction and building materials*. 2019. Vol. 225. Pp. 772–775. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.142

18. Xiang J., Liu L., He Yu., Zhang N., Cui H. Early mechanical properties and evolution of the microstructure of slag-based geopolymers/metakaolin exposed to karst waters. *Cement and concrete composites*. 2019. Vol. 99. Pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.009

19. Wu X., Huo Z., Ren Q., Li H., Lin F., Wei Tengyue. Preparation and characterization of ceramic proppants with low density and high strength using fly ash. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 702. Pp. 442–448. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.01.262

20. Ren K., Wei T., Wu H., Ho Zi, Wang B. The effect of Eu³⁺ doping on the luminescent properties

of Na₃Gd₂(BO₃)₃:Tb³⁺ and the corresponding energy transfer mechanism. *Journal of Environmentally friendly produced by Cailiao Daobao/Materials Review*. 2017. Vol. 31 (3). Pp. 7–10. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.06.002

21. Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Criteria for the selection of clay raw materials for the production of aluminosilicate proppants Reshetova A.A. [Kriterii vybora glinistogo syr'ya dlya polucheniya alyumosilikatnyh propantov]. *Glass and ceramics*. 2009. No. 9. Pp. 10–14. (rus)

22. Vakalova T.V., Pogrebenkov V.M., Vereshchagin V.I., Reshetova A.A. Prospects for the use of domestic refractory raw materials in the technology of ceramic materials for non-ferrous metallurgy and the oil and gas industry [Perspektivy ispol'zovaniya otechestvennogo ognepornogo syr'ya v tekhnologii keramicheskikh materialov dlya cvetnoj metallurgii i neftegazodobyvayushchej otrasli]. *Novye ognepory*. 2009. No. 4. Pp. 10–11. (rus)

23. Vakalova T.V., Reshetova A.A., Pogrebenkov V.I., Vereshchagin V.I. Activation of the process of synthesis of mullite and sintering of aluminosilicate ceramics based on refractory clay raw materials [Aktivaciya processa sinteza mullita i spekaniya alyumosilikatnoj keramiki na osnove ognepornogo glinistogo syr'ya]. *Ognepory i Tekhnicheskaya Keramika*. 2009. No. 7-8. Pp. 74–80. (rus)

24. Vakalova T.V., Reshetova A.A., Revva I.B., Rusinov P.G., Balamygin D.I. Influence of thermochemical activation of clay raw materials on phase formation, microstructure and properties of aluminosilicate proppants. *Applied Glinology*. 2019. Vol 183. 105335. DOI: 10.1016/J.clay.2019.105335

25. Adilov G.A., Povolotsky A.D., Zyryanov S.V., Roshchin V.E. Obtaining proppant from metallurgical slag for the oil industry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. metallurgy*. 2018. Vol. 18 (1). Pp. 58–63. DOI:10.14529/met180108

Information about the authors

Golovko, Dmitry A. Postgraduate student of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates. E-mail: dima.golovko.9898@mail.ru. South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov. Russia, 346407, Novocherkassk, Prosveshcheniya Street, 32.

Received 23.07.2024

Для цитирования:

Головко Д.А. Влияние добавок на прочностные свойства расклинивающих агентов, синтезированных на основе буровых отходов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-71-80

For citation:

Golovko D.A. The effect of additives on the strength properties of wedging agents synthesized on the basis of drilling waste. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 11. Pp. 71–80. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-71-80

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91

Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: shaknv1978@mail.ru*

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ

Аннотация. Эксплуатационная морозостойкость – одно из основных требований, предъявляемых к строительным материалам. Основными факторами, приводящими к ухудшению свойств кирпича, являются циклы замораживания и оттаивания. Самым надежным способом проверки строительных материалов на морозостойкость является тестирование изделий на циклы замораживания-оттаивания. Однако, стандартный метод определения морозостойкости является длительным во времени, энергозатратным и требует использование дорогостоящего и сложного в эксплуатации оборудования. Инженерная отрасль заинтересована в сокращении количества времени испытаний, необходимых для оценки морозостойкости. Исследователи уже длительное время работают над созданием экспресс-методов определения морозостойкости кирпича. В статье предложены новые количественные критерии оценки морозостойкости стеновой керамики на основе гидродинамических параметров пористого твердого тела. Предлагаемые методологии оценки морозостойкости позволяют учесть текстурные свойства пористых изделий. В результате изучения кинетики водонасыщения и водоотдачи керамического черепка установлена закономерность влияния площади петли гистерезиса на морозостойкость стеновой керамики. Благодаря их взаимосвязи получены уравнения регрессии зависимости площади петли гистерезиса от коэффициента водонасыщения и водоотдачи. Предложены расчетные выражения морозостойкости, где морозостойкость кирпича оценивается по значению площади петли гистерезиса или коэффициенту водонасыщения и водоотдачи.

Ключевые слова: количественные критерии оценки морозостойкости, гидродинамические параметры, кривая водонасыщения, кривая водоотдачи, площадь петли гистерезиса, коэффициент водонасыщения и водоотдачи, морозостойкость

Введение. Одним из важнейших эксплуатационных показателей стеновой керамики является морозостойкость [1–3]. Снижение морозостойкости пористых материалов происходит в основном из-за взаимодействий структура – вода, которые, в зависимости от характеристик пористой структуры, физического состояния воды (жидкость или пар) и условий окружающей среды, могут иметь разную величину, включая различные механизмы сорбции. Вода в пористый материал может проникать из нескольких источников: атмосферных осадков, капиллярного впитывания грунтовой влаги, увлажнения вследствие конденсации и сорбции. Большая проникающая способность воды обусловлена малым размером ее молекулы по сравнению с капиллярами и межмолекулярными полостями в твердых материалах и равна 0,28 нм [4–6].

Проникновение дождевой воды в капилляры и более крупные поры возможно только тогда, когда вся поверхность пористого материала покрыта одинарным или двойным слоем молекул воды; иначе вода не сможет проникнуть, когда поверхность полностью сухая. Движущая сила водяного пара представлена градиентом давления, а для переноса жидкой воды – силами капиллярного всасывания [7]. Замораживание кирпича происходит при понижении температуры ниже нуля, после чего начинается процесс замерзания

воды в кирпиче. Плотность льда при 0°C составляет 0,917 г/см³, а плотность воды при 20°C 0,998 г/см³. Один грамм воды, при переходе в лед, увеличивается на 8,8 %, создавая напряжения внутри материала. Развивающееся при этом давление, в зависимости от характера пор, достигает 2500–2800 кгс/см². В системе капилляров, где возникающий лед может вытеснить избыточную влагу в свободные от воды поры, такие большие напряжения исключаются. Если же свободных пор от воды объемов мало, то в капиллярах возможно давление, превышающее предел прочности материала и приводящее к его разрушению при замораживании [8, 9].

Связь между морозостойкостью и капиллярностью идет через микроструктурные характеристики пористых изделий. Пропитанные водой изделия могут вести себя по-разному при охлаждении, несмотря на одинаковую общую поглощающую способность, или эффекты замерзания могут быть одинаковыми для изделий с различной поглощающей способностью. Решающим фактором, влияющим на морозостойкость, является распределение пор по размерам в твердом материале, а их размер и количество влияет на процессы адсорбции, испарения, капиллярности, содержание замерзающей воды, ее миграцию на поверхность [9, 10]. Именно, объем и размер пор определяют способность хранить жидкость и

легкость циркуляции жидкости внутри материалов, а не суммарная пористость, поскольку не дает информации о распределении пор внутри камня [12–16]. В литературе имеется множество работ [17–21], посвященных исследованию кинетики поглощения и ее взаимосвязи с порометрическими характеристиками. Согласно изучению параметров, связанных с поглощением и транспортом жидкости: водопоглощение, капиллярное водопоглощение и высыхание, по анализу графиков кривых сушек кирпичных образцов предполагали наличие мелких или крупных пор, а по скорости водоотдачи и оценивали негативное влияние воды на кирпич. Понимание влияния микроструктуры материала на гигрометрические свойства керамического кирпича играет фундаментальную роль для управления явлениями конденсации и предотвращения разрушения структуры кладки.

Параметры для оценки морозостойкости подразделяют на прямые и косвенные. Прямым, единственным параметром для оценки морозостойкости является устойчивость к циклам замораживания и оттаивания, определяемая согласно ГОСТ 530-2012, в соответствии с которым кирпич должен быть морозостойким и выдерживать определенное количество циклов без видимых признаков разрушения. К косвенным параметрам относят прочность на сжатие, пористая структура, коэффициент насыщения, начальная скорость водопоглощения, водопоглощение и др. В настоящее время ускоренных способов измерения морозостойкости стеновой керамики не существует. До 1954 года в нашей стране определяли морозостойкость ускоренным методом по коэффициенту насыщения, и этот метод был регламентирован в качестве факультативного в ГОСТ 530-41. Считалось, что чем меньше коэффициент насыщения, тем больше объем мелких пор, которые относили к резервным, и считалось, что в них может вытесняться избыточная вода при замерзании. Между тем, такая зависимость наблюдалась далеко не всегда. Это явилось причиной исключения из ГОСТ допускавшейся ранее оценки морозостойкости продукции по коэффициенту насыщения с выпуском нового ГОСТ 530-54 [9].

Из множества литературных источников, очевидно, что разработке методов определения морозостойкости кирпича посвящено большое количество работ [11, 22–24]. Предпринимались попытки улучшить, сократить длительность испытания кирпичей на морозостойкость и тем самым улучшить прогнозирование показателей долговечности конструкций, но линейные корреляции были специфичны для одного материала,

или выявленные зависимости не дали корреляции со стандартным тестом. В литературных источниках [25, 26] авторы использовали ряд физических тестов, включая капиллярное всасывание, воздухопроницаемость, коэффициент насыщения, ртутную порометрию и тесты на прочность. Авторы пришли к выводу, что сочетание таких свойств, как абсорбция и капиллярное всасывание или абсорбция и индекс прочности, распределение пор по размерам и водопоглощение, отношение прочности на сжатие до замораживания и после и коэффициенту десорбции воды при 180–360 минутах сушки, является более предсказуемым для кирпичей, прошедших испытание в морозильной камере, чем использование коэффициента насыщения. Тестирование, которое фокусируется на единичной реакции по косвенным методам оценки, не дает полной информации для анализа морозостойкости в эксплуатации.

Целью данной работы являлось выявить взаимосвязь между гидродинамическими параметрами (водонасыщение, водоотдача) и структурой пористых твердых тел, позволяющей прогнозировать их морозостойкость.

Решением, не применяемым ранее, является разработка принципиально нового подхода к оценке морозостойкости на основе установления закономерностей кинетики водопоглощения и водоотдачи и получении уравнений регрессии, позволяющих прогнозировать и оценивать морозостойкость стеновой керамики.

Материалы и методы. Исследование гидродинамических параметров и морозостойкости осуществляли на образцах в форме кубиков с размером ребра 5 см изготовленных пластическим и двухсторонним двухступенчатым полусухим прессованием при первом удельном давлении 50 кгс/см² и максимальном удельном давлении 300 кгс/см². Керамические массы для изготовления образцов отличались количественным соотношением каолинита к монтмориллониту в глинах, фракционным составом кварцевого песка. Обжиг образцов проводился при температурах 950, 1000 и 1050 °С. Режим обжига: 200 °С – выдержка 1 час, 600 °С – 2 часа, при максимальной температуре выдержка составляла 3 часа. В качестве эталона для сопоставительного анализа для морозостойкости были использованы образцы стеновой керамики промышленно выпускаемыми отечественными предприятиями РФ с морозостойкостью, удовлетворяющей ГОСТ 530-2012.

Для исследования кинетики водонасыщения каждый образец погружали в воду на глубину 1–2 мм так, чтобы нижняя поверхность образца контактировала с водой, и в таком положении выдерживали заданное время (10, 20, 30, 60, 90, 120,

180, 240, 360, 480, 660, 840, 1020, 1440, 2880 мин) в герметично закрытой емкости, где поддерживался постоянный уровень воды. По истечении заданного времени, образцы извлекали из воды, взвешивали и вновь погружали в воду. Отсчет времени выдержки в воде ведут с момента первого погружения образца в воду. Конечной точкой взвешивания была точка 2880 мин, так как за это время произошло полное капиллярное водонасыщение образцов. Количество поглощенной воды $C_{\text{кап}}$ (%) вычисляли по формуле (1):

$$C_{\text{кап}} = \frac{(m_{\tau} - m_{\text{схх}})}{(m_{48} - m_{\text{схх}})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_{τ} – масса образца через определенное время водонасыщения, г; $m_{\text{схх}}$ – масса сухого образца, г; m_{48} – масса образца через 2880 мин (48 часов) капиллярного водонасыщения, г.

Для исследования кинетики сушки образцов водонасыщенные образцы подвергали сушке в сушильном шкафу при постоянной температуре 120°C. Измерение количества испарившейся воды производили путем взвешивания через промежутки времени с шагом 15 минут до полного испарения находящейся в образце воды. Максимальное время водоотдачи для всех образцов составило 12 часов. Количество испарившейся воды $C_{\text{исп}}$ (%) вычисляли по формуле (2):

$$C_{\text{исп}} = \frac{(m_{48} - m_{\tau})}{(m_{48} - m_{\text{схх}})} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где m_{48} – масса образца через 2880 мин (48 часов) капиллярного водонасыщения, г; m_{τ} – масса образца через определенное время сушки, г; $m_{\text{схх}}$ – масса сухого образца, г.

Коэффициент водонасыщения и водоотдачи (K) [30] рассчитывали, как результат частного чисел количества поглощенной воды и количества испарившейся воды в фиксированных точках от времени водонасыщения и водоотдачи по формуле (3):

$$K = \frac{C_{\text{кап}}}{C_{\text{исп}}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{кап}}$ – количество поглощенной воды в материале при капиллярном водонасыщении при 5 % от времени водонасыщения, что соответствует 2,4 часа водонасыщения, при 10 % от времени водонасыщения – 4,8 часа и при 20 % – 9,6 часа водонасыщения; $C_{\text{исп}}$ – количество испарившейся

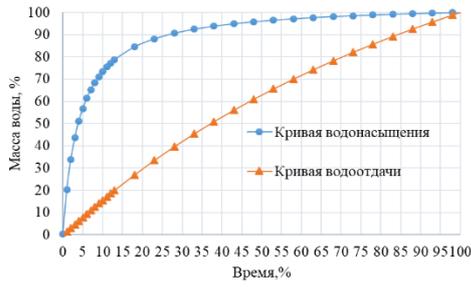
воды в материале в процессе сушки при 5 %, что соответствует 0,6 часа сушки, при 10 % от времени водонасыщения – 1,2 часа сушки и при 20 % от времени водонасыщения – что соответствует 2,4 часа сушки.

Контроль морозостойкости образцов проводили методом объемного замораживания согласно ГОСТ 7025-91, пункт 7 «Контроль морозостойкости при объемном замораживании». Согласно ГОСТ 7025-91 «Кирпич и камни керамические и силикатные», для контроля морозостойкости по степени повреждений отбирают не менее пяти образцов. Все образцы насыщают водой и подвергают попеременному многократному замораживанию и размораживанию при температуре воздуха в камере от минус 15 до минус 20 °С. Продолжительность одного замораживания образцов должна быть не менее 4 ч. Продолжительность оттаивания должна быть не менее половины продолжительности замораживания. При оценке морозостойкости по степени повреждений производят визуальный осмотр образцов и фиксируют появившиеся дефекты. Согласно техническим требованиям ГОСТ 530-2012 пункт 5.2.7 – кирпич и камень должны быть морозостойкими и в зависимости от марки по морозостойкости в насыщенном водой состоянии должны выдерживать без каких-либо видимых признаков повреждений или разрушений – растрескивание, шелушение, выкрашивание, отколы (кроме отколов от известковых включений) – не менее 25; 35; 50; 75; 100; 200 или 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Марка по морозостойкости клинкерного кирпича должна быть не ниже F75, лицевых изделий – не ниже F50. Допускается по согласованию с потребителем поставлять лицевые изделия марки по морозостойкости F35.

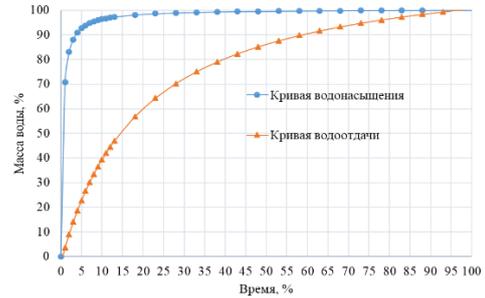
Основная часть. По экспериментально полученным результатам количества поглощенной и испарившейся воды для всех исследуемых образцов были построены графики зависимости в одной системе координат кривых водонасыщения и кривых водоотдачи от времени водонасыщения и сушки образцов [27]. Между кривыми образовались различные по площади области, так называемые петли гистерезиса, которые являются количественными критериями оценки морозостойкости стеновой керамики (рис. 1). На основе экспериментальных исследований впервые была установлена зависимость влияния площади петли гистерезиса на морозостойкость образцов: увеличение площади петли гистерезиса соответствует снижению морозостойкости образцов (табл. 1). Площадь петли гистерезиса варьируется от 3156 ед. до 600 ед. Варьирование площади

петли гистерезиса связано с изменением следующих факторов: количественным соотношением

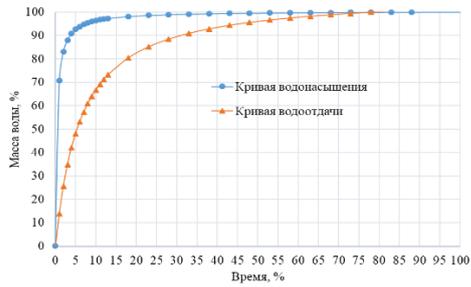
каолинита к монтмориллониту, фракционным составом кварцевого песка, способом формования и температурной обработкой образцов.



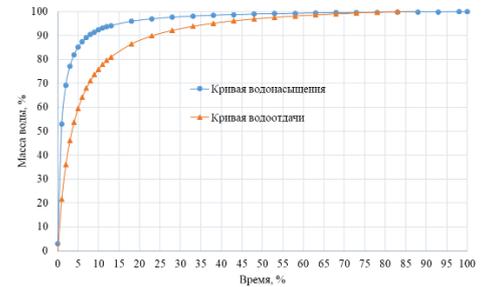
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Зависимости кривых кинетики водонасыщения и водоотдачи образцов, отличающиеся размером площади петли гистерезиса: а) – площадь петли 3156 ед.; б) – площадь петли 2079 ед.; в) – площадь петли 1000 ед.; г) – площадь петли 600 ед.

Таблица 1

Результаты расчета площади петли гистерезиса и морозостойкости образцов

№ образца	Площадь петли гистерезиса, ед.	Коэффициент водонасыщения и водоотдачи (K), %	Морозостойкость, рассчитанная по формуле (4), циклы	Морозостойкость, рассчитанная по формуле (5), циклы	Морозостойкость ГОСТ 7025-91, циклы
1	3156	7,2	7	7	7
2	2679	5,34	7	8	9
3	2074	3,96	14	14	15
4	2507	5,28	8	8	8
5	2283	4,74	10	9	9
6	2079	3,96	14	14	15
7	1211	2,32	67	61	65
8	1195	2,28	70	64	65
9	1118	2,11	81	79	80
10	1667	3,2	29	25	25
11	1498	2,67	39	41	40
12	1310	2,44	56	53	50
13	1498	2,74	39	38	35
14	1289	2,43	58	54	55
15	1000	1,92	102	101	100
16	1528	2,88	37	33	30
17	1325	2,45	54	52	47
18	1000	1,89	102	105	100
19	600	1,37	252	240	250
20	710	1,52	192	183	190
21	790	1,62	160	156	150

Площадь петли гистерезиса для каждого образца была рассчитана путем интегрирования уравнений кривых регрессий, подобранных к каждой кривой водонасыщения и кривой водоотдачи. Обратная пропорциональная зависимость между морозостойкостью образцов и площадью петли гистерезиса (рис. 2) описывается следующим уравнением:

$$M = a + b \cdot S^{0.5} + \frac{c}{S}, \quad (4)$$

где M – морозостойкость, циклы; S – площадь петли гистерезиса, относит. ед.; a , b , c – коэффициенты уравнения регрессии: $a = -266,23$; $b = 3,39$; $c = 261143,96$.

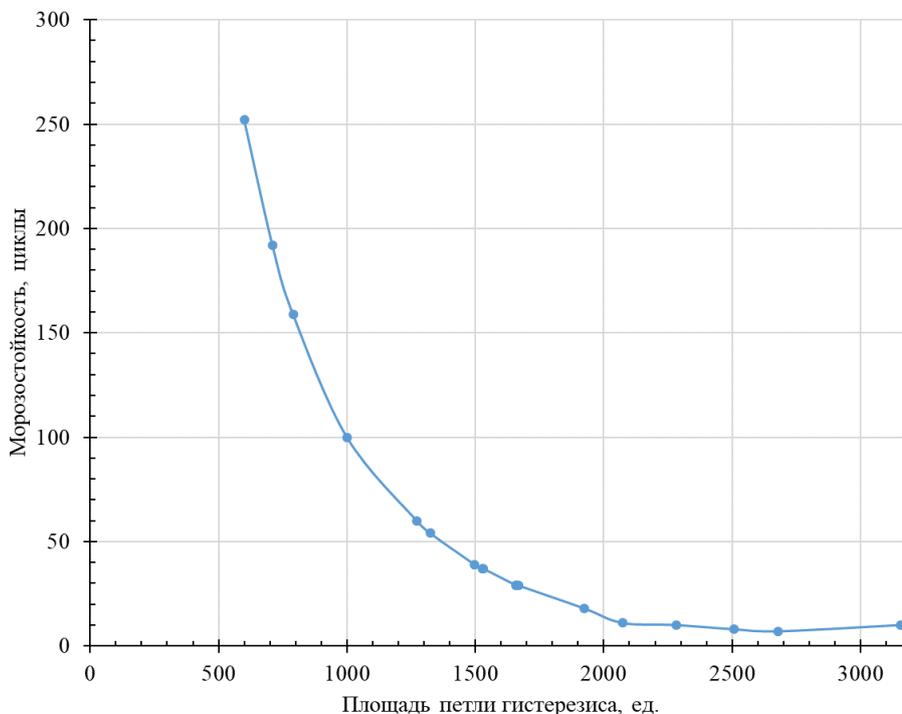


Рис. 2. Зависимость морозостойкости образцов от площади петли гистерезиса

Определение морозостойкости образцов по формуле 4 соответствует морозостойкости, определенной прямым объемным замораживанием согласно ГОСТ 7025-91 (табл. 1).

Для исключения математического процесса расчета площади петли гистерезиса по формуле (4) был рассчитан коэффициент водонасыщения и водоотдачи (K), полученный как результат частного чисел количества поглощенной воды и количества испарившейся воды в фиксированных точках водонасыщения и сушки образцов при:

- 5 %, что соответствует 2,4 часа водонасыщения (%) и 0,6 часа сушки (%);
- 10 %, что соответствует 4,8 часа водонасыщения (%) и 1,2 часа сушки (%);
- 20 %, что соответствует 9,6 часа водонасыщения (%) и 2,4 часа сушки (%).

Установлен уровень пропорциональности между площадью петли гистерезиса и количеством поглощенной и испарившейся воды в данных точках, построены графики зависимости коэффициента водонасыщения и водоотдачи от морозостойкости образцов (рис. 3).

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, а) уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,0023x - 0,3985,$$

где коэффициент корреляции имеет максимальное значение, равное 0,982.

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 10 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, б) уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,0012x + 0,2571,$$

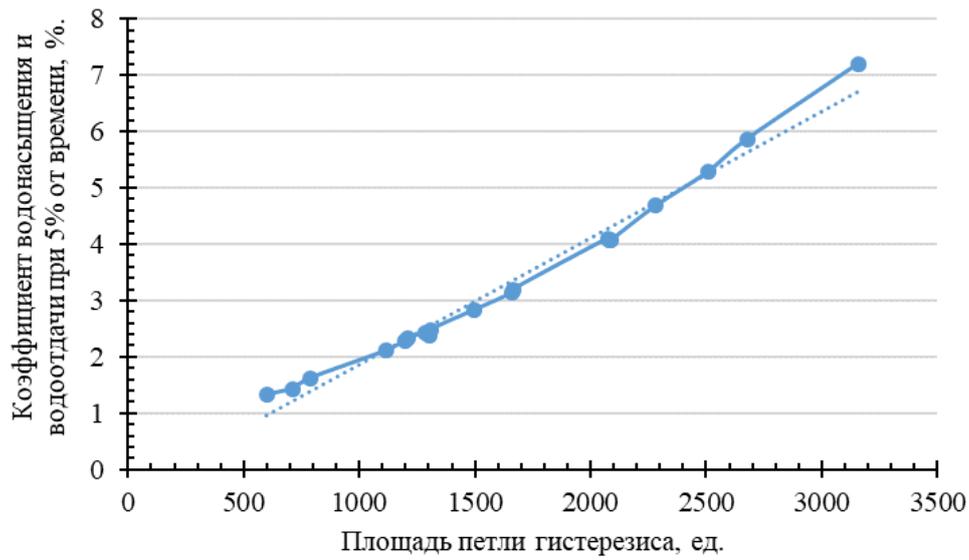
однако коэффициент корреляции снизился на 0,062 и составил 0,922.

При коэффициенте водонасыщения и водоотдачи при 20 % от времени водонасыщения и сушки (рис. 3, в) уравнение регрессии имеет вид:

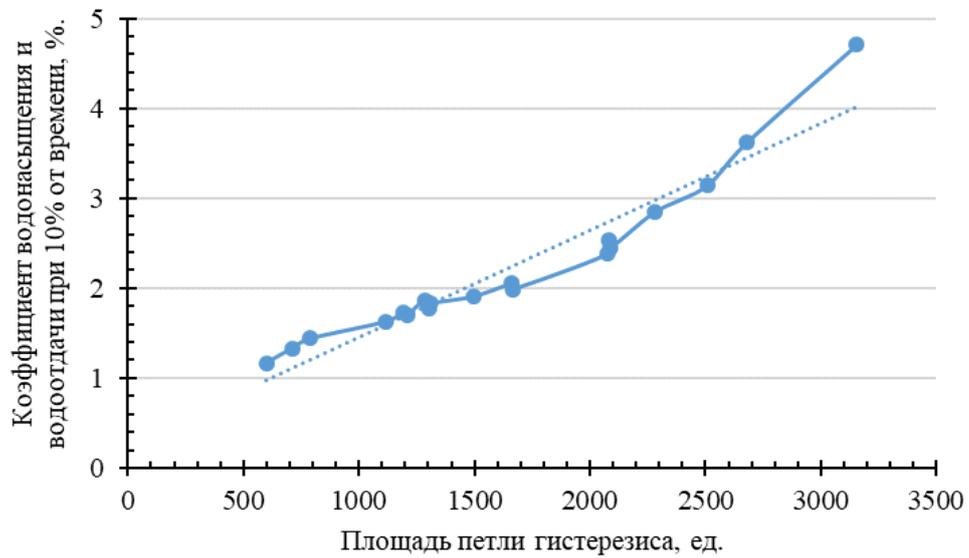
$$y = 0,0006x + 0,5353,$$

а коэффициент корреляции имеет наименьшее значение, равное 0,815.

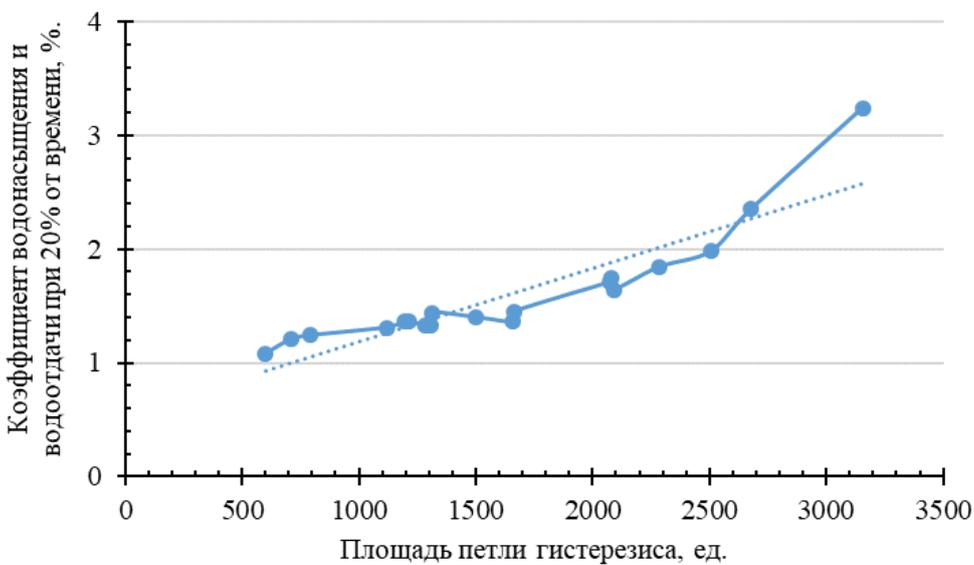
Более высокое значение коэффициента корреляции, равное 0,982, может быть объяснено тем, что именно при этом времени происходит наиболее важное капиллярное водонасыщение и испарение, а размер поровых каналов способствует более свободному передвижению воды и миграции на поверхность материала.



a)



b)



v)

Рис. 3. Зависимость площади петли гистерезиса от коэффициента водонасыщения и водоотдачи: а – при 5%; б – 10%; в – 20% от времени водонасыщения и сушки

Таким образом, для построения графика зависимости (рис. 4) морозостойкости от коэффициента водонасыщения и водоотдачи были взяты значения коэффициента водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и

сушки, где наблюдался коэффициент корреляции с максимальным значением. Это позволит наиболее адекватно оценивать показатели морозостойкости.

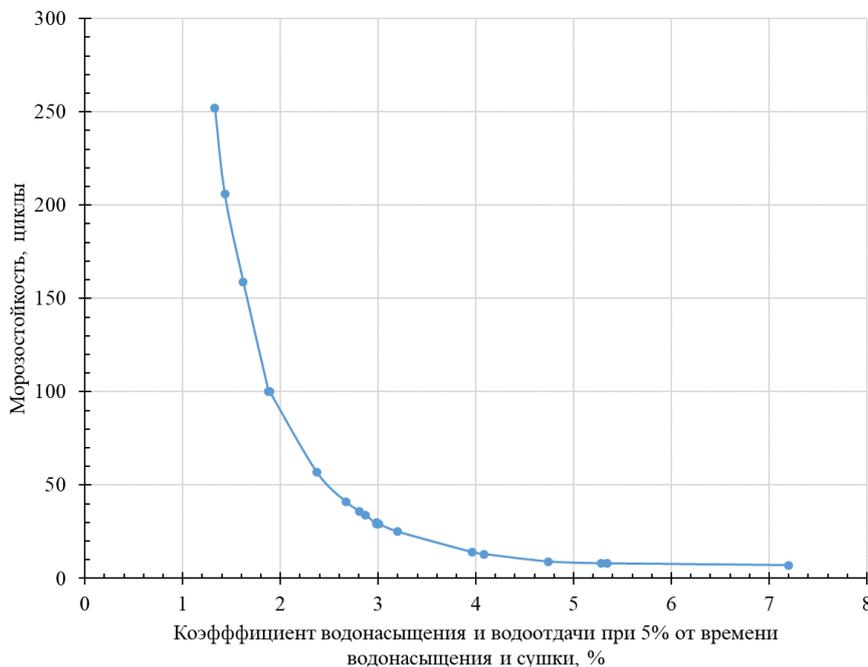


Рис. 4. График зависимости морозостойкости образцов от коэффициента водонасыщения и водоотдачи при 5 % от времени водонасыщения и сушки

Выявленная зависимость морозостойкости от коэффициента водонасыщения и водоотдачи пористого образца описывается следующим уравнением:

$$M = a + \frac{b}{K} + \frac{c}{K^2}, \quad (5)$$

где K – коэффициент водонасыщения и водоотдачи, равен результату частного чисел количества поглощенной воды $C_{\text{кап}}$ и количества испарившейся воды $C_{\text{исп}}$ при 5 % от времени водонасыщения и сушки, что соответствует 2,4 часа водонасыщения и 0,6 часам сушки; a , b , c – коэффициенты уравнения регрессии: $a = 22,195$; $b = -204,845$; $c = 682,944$.

Полученные данные расчета морозостойкости образцов с использованием формулы (5) показали хорошую корреляцию с морозостойкостью, рассчитанной согласно ГОСТ 7025-91 (табл. 1).

Определение морозостойкости по данным формулам может быть использовано для пористых материалов с водопоглощением от 6 до 20 % [27, 28].

Вывод. Разработанная на основе принципиально новых подходов методология оценки морозостойкости стеновой керамики позволяет оце-

нить структуру пор изделий на основе комбинации двух параметров – водонасыщения и сушки. Использование предложенных количественных критериев, регрессивных зависимостей и принципиально новых расчётных выражений позволяет существенно сократить время проведения испытаний за счет исключения трудоемкого и длительного процесса циклического тестирования кирпичей на циклы замораживания-оттаивания. Данные методы прогнозирования морозостойкости запатентованы и рекомендуются к широкому промышленному внедрению в центральных заводских лабораториях на предприятиях строительной индустрии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуров Н.Г., Наумов А.А., Иванов Н.Н. Пути повышения морозостойкости кирпича полусухого прессования // Строительные материалы. 2012. № 3. С. 40–42.
2. Shakurova N.V., Ivleva I.A., Doroganov E.A., Doroganov V.A., Evtushenko E.I. Influence of the mineralogical composition of clays on the capillary-porous structure and the frost resistance of ceramic brick // Glass and Ceramics. 2023. Vol. 80. Pp. 137–142. DOI: 10.1007/s10717-023-00572-y
3. Ивлева И.А., Беликова М.Е. Минералогический состава глин как один из основополагаю-

щих факторов морозостойкости теплоэффективной керамики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 185–188.

4. Raimondo M., Dondi M., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content of clay bricks: the influence of the porous structure // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.017

5. Медведев А., Разоренов А., Сержантов А. Кинетика влагонасыщения композиционных материалов // *Технология в электронной промышленности*. 2014. № 4. С. 11–16.

6. Старцев С.А., Ступак М.В., Чиркин А.С. Оценка степени влияния капиллярного подсоса на увлажнение кирпичной кладки // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 4. С. 293–297.

7. Delgado J.M.P.Q., Guimaraes A.S., Guimaraes, Freitas V.P., Antepara I. Salt damage and rising damp treatment in building structures // *Advances in materials science and engineering*. 2016. Vol. 2016. 1280894. DOI:10.1155/2016/1280894

8. Макарова И.А., Лохова Н.А. Физико-химические методы исследования строительных материалов. Учеб. пособие. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 139 с.

9. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость стеновых материалов. Ленинград, Москва: Госстройиздат, 1962. 166 с.

10. Valdeon L., Esbert R.M., Grossi C.M. Hydric properties of some spanish building stones: a petrophysical interpretation // *Materials Research Society symposia proceedings*. Materials Research Society. 2011. Vol. 267. Pp. 911–916. DOI: 10.1557/PROC-267-911

11. Gummerson R.J., Hall C., Hoff W.D. The Suction Rate and the Sorptivity of Brick // *Transactions and journal of the British ceramic society*. 1981. Vol. 80. № 5. Pp. 150–152.

12. Raimondo M.M. Dondi, F. Mazzanti, Stefanizzi P. Equilibrium moisture content of clay bricks: the influence of the porous structure // *Building and Environment*. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932.

13. Наумов А.А., Юдин А.Н. Повышение морозостойкости керамического черепка из глинистого сырья Шахтинского завода // *Материалы международной науч.-практ. конф. Строительство*. Ростов-на-Дону. 2012. С. 46–47.

14. Maage M. Frost resistance and pore size distribution in bricks // *Materials and Structures*. 1984. Vol. 17. Pp. 345–350.

15. Абдрахимов А.В., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Технические свойства черепицы из техногенного сырья с пиритными огарками // *Стекло и керамика*. 2006. № 4. С. 26–28.

16. Лохова Н.А. Морозостойкие строительные керамические материалы и изделия на основе кремнеземистого сырья: монография. Братск: БрГУ, 2009. 268 с.

17. Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., Теплова М.Ф. Исследование кинетики водопоглощения мелкозернистого бетона // *Технические науки «Молодой ученый»*. 2015. № 13. С.132–134.

18. Cultrone G., Sebastian E., Elert K., Torre M.J., Cazalla O., Rodriguez-Navarro C. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks // *Journal of the European Ceramic Society*. 2004. Vol. 24. № 3. Pp. 547–564. DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00249-8

19. Медведев А., Разоренов А., Сержантов А. Кинетика влагонасыщения композиционных материалов // *Технология в электронной промышленности*. 2014. № 4. С. 11–16.

20. Raimondo M., Dondi M., Gardini D., Guarini G., Mazzanti F. Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks // *Construction and building materials*. 2009. Vol. 23. № 7. Pp. 2623–2630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009

21. Романенко И.И., Еличев К.А. Факторы, влияющие на капиллярное водонасыщение бетонных образцов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 10 (часть 2). С. 343–348.

22. Netinger I., Vravec M., Ranogajec J., Vucetic S. Evaluation of brick resistance to freeze / thaw cycles according to indirect procedures // *Gradevinar*. 2014. Vol. 66. № 3. Pp. 197–209. DOI: 10.14256/JCE.956.2013

23. Netinger Grubesa I., Vravec M., Ranogajec J., Vucetic S. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze–thaw cycles // *Materials*. 2020. Vol. 13. 2364. DOI: 10.3390/ma13102364

24. Denis A. Testing and freeze-thaw durability prediction for clay bricks // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014. Vol. 3. № 7. Pp. 1270–1275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS070791

25. Sereda P.J., Litvan G.G. Durability of Building Materials and Components // *American Society for Testing and Materials*. 1980. Vol. 8. P. 455–463.

26. Koroth S., Fazio P., Feldman D. Comparative Study of Durability Indices for Clay Bricks // *Journal of Architectural Engineering*. 1998. Vol. 4. № 1. Pp. 26–33. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0431(1998)4:1(26)

27. Пат. 2794714 Российская Федерация МПК G01N 17/100, G01N 25/02 Способ определения морозостойкости пористых материалов / Н.В. Шакурова, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022119139; заявл. 13.07.2022; опубл. 24.04.2023, Бюл. № 12. 12 с.

28. Пат. 2794714 Российская Федерация МПК G01 25/02 Способ определения морозостойкости пористых материалов / Н.В. Шакурова, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022125339; заявл. 27.09.2022; опубл. 25.05.2023, Бюл. № 15. 16 с.

рога, Е.А. Дороганов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2022125339; заявл. 27.09.2022; опубл. 25.05.2023, Бюл. № 15. 16 с.

Информация об авторах

Шакурова Наталия Васильевна, ведущий инженер кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дороганов Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: doroganov@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бессмертный Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ивлева Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. E-mail: iviran1964@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 25.09.2024 г.

© Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А., 2024

**Shakurova N.V., Doroganov E.A., Bessmertnyi V.S., Ivleva I.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: shaknv1978@mail.ru*

QUANTITATIVE CRITERIA FOR ASSESSING FROST RESISTANCE BASED ON THE ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF WALL CERAMICS

Abstract. Operational frost resistance is one of the main requirements for building materials. The main factors leading to deterioration of the properties of bricks are freeze-thaw cycles. The most reliable way to check building materials for frost resistance is to test products for freeze-thaw cycles. However, the standard method for determining frost resistance is time-consuming, energy-consuming, and requires the use of expensive and difficult-to-use equipment. The engineering industry is interested in reducing the amount of testing time required to assess frost resistance. Researchers have been working for a long time to create express methods for determining the frost resistance of bricks. The article proposes new quantitative criteria for assessing the frost resistance of wall ceramics based on the hydrodynamic parameters of a porous solid. The proposed methodologies for assessing frost resistance make it possible to take into account the textural properties of porous products. As a result of studying the kinetics of water saturation and water yield of ceramic shards, a pattern of the influence of the hysteresis loop area on the frost resistance of wall ceramics was established. Due to their interrelation, regression equations were obtained for the dependence of the hysteresis loop area on the coefficient of water saturation and water yield. Calculation expressions for frost resistance are proposed, where the frost resistance of brick is estimated by the value of the hysteresis loop area or the coefficient of water saturation and water yield.

Keywords: quantitative criteria for assessing frost resistance, hydrodynamic parameters, water saturation curve, water yield curve, hysteresis loop area, water saturation and water yield coefficient, frost resistance

REFERENCES

1. Gurov N.G., Naumov A.A., Ivanov N.N. Ways to increase the frost resistance of semi-dry pressed bricks [Puti povysheniya morozostojkosti kirpicha polusukhogo pressovaniya]. Building materials. 2012. No. 3. Pp. 40–42. (rus)
2. Shakurova N.V., Ivleva I.A., Doroganov E.A., Doroganov V.A., Yevtushenko E.I. Influence

of the mineralogical composition of clays on the capillary-porous structure and frost resistance of ceramic bricks. Glass and ceramics. 2023. Vol. 80. Pp. 137–142. DOI: 10.1007/s10717-023-00572-y

3. Ivleva I.A., Belikova M.E. Mineralogical composition of clays as one of the fundamental factors of frost resistance of heat-efficient ceramics [Mineralogicheskij sostava glin kak odin iz osnovno-

- polagayushchikh faktorov morozostojkosti teploeffektivnoj keramiki]. Bulletin of BGTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 8. Pp. 185–188. (rus)
4. Raimondo M., Dondi M., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content in clay bricks: the influence of a porous structure. Construction and the environment. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.10.017
5. Medvedev A., Razorenov A., Sergeants A. Kinetics of moisture saturation of composite materials [Kinetika vlagonasysheniya kompozicionnyh materialov]. Technologies in electronic industry. 2014. No. 4. Pp. 11–16. (rus)
6. Startsev S.A., Stupak M.V., Chirkin A.S. Assessment of the effect of capillary suction on the moistening of brickwork [Ocenka stepeni vliyaniya kapillyarnogo podsosa na uvlazhnenie kirpichnoj kladki]. Innovations and investments. 2021. No. 4. Pp. 293–297. (rus)
7. Delgado H.M.P.K., Guimaraes A.S., Guimaraes V.P., Freitas V.P., Antepara I. Salt damage and increased humidity of building structures. Achievements in materials science and engineering. 2016. Vol. 2016. 1280894. DOI:10.1155/2016/1280894
8. Makarova I.A., Lokhova N.A. Physico-chemical methods of research of building materials. [Fiziko-himicheskie metody issledovaniya stroitelnyh materialov]. Guide. Bratsk: BrGU Publishing House. 2011. 139 p. (rus)
9. Berkman A.S., Melnikova I.G. Structure and frost resistance of wall materials. [Struktura i morozostojkost stenovyh materialov]. Leningrad, Moscow: Gosstroyizdat, 1962. 166 p. (rus)
10. Valdeon L., Esbert R.M., Grossi K.M. Hydrate properties of some Spanish building stones: petrophysical interpretation. Proceedings of the symposia of the Society of Materials Science. Society for Materials Science Research. 2011. Vol. 267. Pp. 911–916. DOI: 10.1557/PROC-267-911
11. Hammerson R.J., Hall K., Hoff W.D. The suction rate and sorption capacity of bricks // Proceedings and Journal of the British Ceramic Society. 1981. Vol. 80. No. 5. Pp. 150–152.
12. Raimondo M.M., Dondi F., Mazzanti F., Stefanizzi P. Equilibrium moisture content in clay bricks: the influence of porous structure. Construction and the environment. 2007. Vol. 42. Pp. 926–932.
13. Naumov A.A., Yudin A.N. Increasing the frost resistance of ceramic shards made from clay raw materials of the Shakhty plant [Povyshenie morozostojkosti keramicheskogo cherepka iz glinistogo syrya Shahtinskogo zavoda]. Materials of the international scientific and practical conference. conf. Construction. Rostov-on-Don. 2012. Pp. 46–47. (rus)
14. Maage M. Frost resistance and pore size distribution in brick. Materials and structures. 1984. Vol. 17. Pp. 345–350.
15. Abdrakhimov A.V., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Technical properties of tiles made from technogenic raw materials with pyrite stubs [Tehnicheskie svojstva cherepicy iz tehnogenogo syrya s piritnymi ogarkami]. Glass and ceramics. 2006. No. 4. Pp. 26–28. (rus)
16. Lokhova N.A. Frost-resistant ceramic building materials and products based on silica raw materials: monograph. [Morozostojkie stroitelnye keramicheskie materialy i izdeliya na osnove kremnezemistogo syrya: monografiya]. Bratsk: BrGU. 2009, 268 p. (rus)
17. Korovkin M.O., Eroshkina N.A., Eroshkina M.F., Teplova M.F. Investigation of the kinetics of water absorption of fine-grained concrete [Issledovanie kinetiki vodopoglosheniya melkozemistogo betona]. Technical sciences «Young scientist». 2015. No. 13. Pp. 132–134. (rus)
18. Caltrone G., Sebastian E., Elert K., Torre M.H., Casaglia O., Rodriguez-Navarro K. The influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. Journal of the European Ceramic Society. 2004. Vol. 24. No. 3. Pp. 547–564. DOI: 10.1016/S0955-2219(03)00249-8
19. Medvedev A., Razorenov A., Sergeants A. Kinetics of moisture saturation of composite materials [Kinetika vlagonasysheniya kompozicionnyh materialov]. Technologies in electronic industry. 2014. No. 4. Pp. 11–16. (rus)
20. Raimondo M., Dondi M., Gardini D., Guarini G., Mazzanti F. Predicting the initial rate of water absorption of clay bricks. Construction and building materials. 2009. Vol. 23. No. 7. Pp. 2623–2630. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009
21. Romanenko I.I., Elichev K.A. Factors influencing capillary water saturation of concrete samples [Fakторы vliyayushie na kapillyarnoe vodonasyshenie betonnyh obrazcov]. Fundamental research. 2016. No. 10 (part 2). Pp. 343–348. (rus)
22. Netinger I., Vrachevich M., Ranogaets Yu., Vuchetich S. Assessment of brick resistance to freezing/thawing cycles by indirect methods. Gradevinar. 2014. Vol. 66. No. 3. Pp. 197–209. DOI: 10.14256/JCE.956.2013
23. Netinger I., Grubesa, Vrachevich M., Ranogaets J., Vuchetich S. The effect of pore size distribution on the resistance of clay bricks to freeze-thaw cycles. Materials. 2020. Vol. 13. 2364. DOI: 10.3390/ma13102364
24. Denis A. Testing and forecasting the durability of clay bricks during freezing and thawing. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 2014. Vol. 3. No. 7. 1270–1275. DOI: 10.17577/IJERTV3IS070791

25. Sereda P.J., Litvan G.G. Durability of building materials and components. American Society for Testing and Materials. 1980. Vol. 8. Pp. 455–463.

26. Koroth S., Faze P., Feldman D. Comparative Study of Durability Indices for Clay Bricks. Journal of Architectural Engineering. 1998. Vol. 4. No.1. Pp. 26–33. DOI: 10.1061/(ICQ)1076-0431(1998)4:1(26)

27. Shakurova N.V., Doroganov E.A. Method for determining the frost resistance of porous materials Patent RF, no. 2022119139, 2023.

28. Shakurova N.V., Doroganov E.A. Method for determining the frost resistance of porous materials Patent RF, no. 2022125339, 2023.

Information about the authors

Shakurova, Natalia V. Leading Engineer of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: shaknv1978@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Doroganov, Evgeny A. Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: doroganov@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Bessmertnyi, Vasily S. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Standardization and Quality Management. E-mail: vbessmertnyi@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Ivleva, Irina A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: iviran1964@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Received 25.09.2024

Для цитирования:

Шакурова Н.В., Дороганов Е.А., Бессмертный В.С., Ивлева И.А. Количественные критерии оценки морозостойкости на основе анализа гидродинамических параметров стеновой керамики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 81–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91

For citation:

Shakurova N.V., Doroganov E.A., Bessmertnyi V.S., Ivleva I.A. Quantitative criteria for assessing frost resistance based on the analysis of hydrodynamic parameters of wall ceramics. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 81–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-81-91

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-92-101

Харламов В.А., Лопанов А.Н., Дементьев К.В., Сысоев П.И.Белгородский государственный университет им. В.Г. Шухова***E-mail: wladimir.harlamov@mail.ru*

МОДИФИКАЦИЯ БЕТОНОВ ИЗ ТАМПОНАЖНОГО ЦЕМЕНТА ДОБАВКАМИ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЭКСТРАКЦИИ ЛЕЦИТИНА

Аннотация. В ходе данной работы были исследованы прочностные характеристики и фазовый состав цементного камня, изготовленного из тампонажного цемента с добавлением отходов экстракции лецитина. Установлено, что добавка на основе технического лецитина в концентрации до 0,1 % способствует значительному увеличению прочностных характеристик цементного материала. Путём анализа порошковых рентгенограмм цементного камня с добавлением технического лецитина было выявлено увеличение интенсивности пиков продуктов гидратации цемента и повышение кристалличности образца. Также наблюдается появление новой фазы окенита, что может положительно влиять на прочность материала. При повышении концентрации добавки выше 0,1 % наблюдается снижение прочностных характеристик, предположительно из-за увеличения пористости цементного камня. Исследование показало, что оптимальная концентрация технического лецитина для улучшения прочностных свойств составляет 0,1 %. Результаты данного исследования позволяют предположить, что использование отходов экстракции лецитина в качестве добавки в цементные композиции может быть эффективным способом утилизации этих отходов, одновременно улучшая свойства цементного материала. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию состава добавок и изучение их долгосрочного влияния на эксплуатационные характеристики цементных композиций.

Ключевые слова: тампонажный цемент, добавки, лецитин, отходы.

Введение. Цементный материал является ключевым компонентом в строительстве, применяемым для создания прочных и устойчивых конструкций. В последние десятилетия большое внимание уделяется исследованиям новых добавок, способных улучшить свойства цементного камня и повысить его производственную эффективность. Одним из перспективных направлений в этой области является использование отходов переработки лецитина – важного биологического вещества, широко применяемого в промышленности.

Лецитин – это группа фосфолипидов, естественных компонентов клеточных мембран, широко распространенных в природе. Он получается в основном из соевых бобов и используется в различных отраслях промышленности, включая пищевую, фармацевтическую и косметическую. Лецитин известен своей гидрофобностью и способностью к эмульгированию [1], что потенциально может благоприятно сказаться на фазовом составе бетона в процессе его твердения. Благодаря своим уникальным химическим свойствам, лецитин является важной функциональной добавкой, которая может быть также полезна в строительной отрасли.

Идея получения добавок из органических отходов производств, влияющих на характеристики бетонных смесей, рассматривалась множеством исследователей [2-4]. Часто такие добавки используют для гидрофобизации бетонов.

Например, в работах [5, 6] в качестве гидрофобизирующей добавки использовали соапстоки растительных масел. Также соапстоки использовали как гидрофобизирующую добавку для исследования эффекта автоактивации цемента [7]. В работах [8–11] исследовано влияние добавок на основе лигнина – отхода деревоперерабатывающей промышленности.

В настоящей статье мы сосредоточим внимание на влиянии добавок, полученных при переработке лецитина и его отходов, на фазовый состав и прочностные характеристики тампонажного цемента. Мы рассмотрим три типа добавок: на основе чистого лецитина, на основе технического лецитина, а также на основе оксалатно-жирного осадка. Каждая из этих добавок имеет свои уникальные свойства, которые могут оказать разное влияние на структуру и прочность цементного материала. В исследовательской среде большое внимание уделяется исследованию влияния органических добавок в качестве добавок при приготовлении цементного камня, в частности и жирных кислот, одного из главных компонентов лецитина и его отходов [12, 13]. Важно понимать, что отход экстракции лецитина – технический лецитин, уступает исходному только в содержании фосфолипидов, а количество жирных кислот и прочих компонентов почти не претерпевает изменений. Например, при добавлении технического лецитина в композицию относительная прочность образцов бетонной композиции на сжатие может увеличиваться в 3,5 раза

[14]. В литературе уже известно положительное влияние оксалатов, также образующихся в процессе переработки лецитина, на свойства бетонов [15].

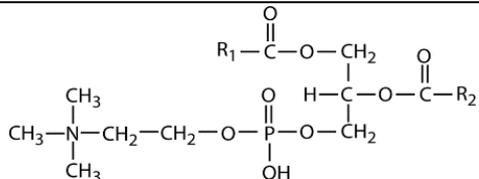
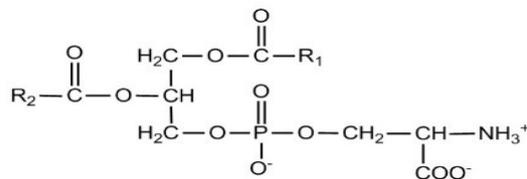
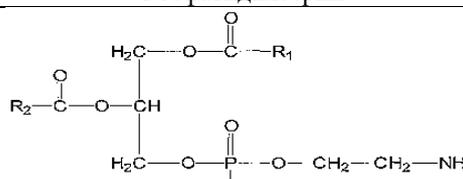
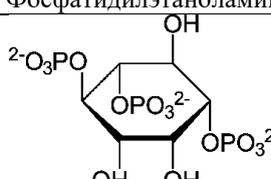
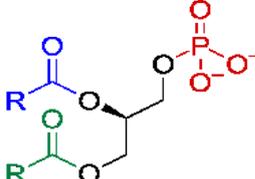
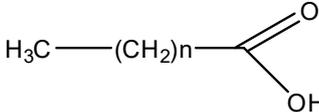
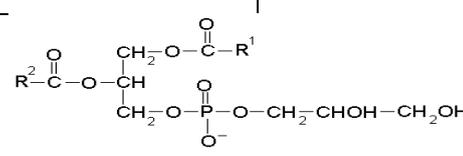
Исследование влияния указанных добавок на фазовый состав и прочностные характеристики тампонажного цемента имеет важное значение, как для практического строительного производства, так и для научного сообщества. Полученные результаты могут пролить свет на новые перспективы в области улучшения цементных

материалов и способствовать развитию экологически чистых технологий переработки промышленных отходов.

Материалы и методы. Объектом исследования послужил цементный камень, полученный путем нормально-влажного твердения в течение 28 суток цементного теста нормальной густоты, с добавлением добавок полученных из отходов экстракции лецитина и самого исходного лецитина.

Таблица 1

Химический состав добавок (в процентах)

Компоненты	Добавка	№ 1	№ 2	№ 3
	Фосфатидилхолин	≤ 0,1	9	–
	Фосфатидилсерин	≤ 0,1	3	–
	Фосфатидилэтаноламин	≤ 0,1	3	–
	Инозитолфосфаты	≤ 0,1	9	–
	Фосфатидные кислоты	15	23	4
	Жирные кислоты			
	Фосфатидилглицерины	6	9	–
Соевое масло		33	32	–
Нейтральные липиды		45	12	40
Оксалат натрия		–	–	56

В качестве добавок для исследования были выбраны: 1. Технический лецитин; 2. Соевый лецитин; 3. Оксалатно-жировой осадок. Объекты исследования 1 и 2 представляют собой густую текучую массу, образующую устойчивые эмульсии с водой. Объект 3 жирный, мылоподобный, но также образующий устойчивые эмульсии с водой. Объекты исследования под номерами 1 и 3 являются промышленными отходами. Химический состав добавок приведён в табл. 1.

Для получения цементного камня использовали тампонажный цемент и предварительно приготовленную водную эмульсию добавки. Для обеспечения однородности эмульсии её предварительно перемешивали в течение получаса при 40 °С, после чего охлаждали до комнатной температуры.

Для приготовления цементного камня использовался цементный раствор с водоцементным соотношением В/Ц = 0,33, изготовленный из растворов нормальной густоты, на основе бездобавочного тампонажного цемента. Предел прочности на сжатие определяли на образцах кубической формы 20×20×20 мм. Условия твердения – температура (20±2) °С и относительная влажность воздуха 50–70 %. Перед проведением испытаний образцы выдерживали в течение 28 суток для отверждения в нормальных условиях.

Основная часть. Для лучшего понимания природы добавок необходимо привести общую схему производства изолированных фосфолипидов, в результате которой образуются отходы. Общая схема процесса производства изолированных фосфолипидов: процесс начинается со смешивания лецитина с растворителем (вода, низкомолекулярные спирты), после чего содержимое реактора перемешивают или диспергируют, далее полученную смесь разделяют. Верхняя органическая фаза идёт дальше на очистку и выделение целевого продукта, а нижняя лецитиновая фаза подвергается отгонке растворителя, что приводит к получению технического (обеднённого) лецитина. При дальнейшей очистке экстракта образуется продукт нейтрализации щавелевой кислотой щелочей, ведущих переэтерификацию. В процессе нейтрализации массы после переэтерификации образуется мягкий осадок богатый нейтральными липидами и натриевой солью щавелевой кислоты, который в последствие также упаривают, для удаления лишнего растворителя и получают твердый отход, так называемый оксалатно-жировой осадок.

В рамках данного исследования больше внимания уделялось добавкам, полученным из отходов производства, а именно техническому лецитину и оксалатно-жировому осадку. Но также

были исследованы и добавки на основе исходного реагента и конечного продукта для более полного понимания картины формирования фаз, а также для сравнения прочностных характеристик.

За счёт высокого содержания жирных кислот и фосфолипидов, лецитин обладает способностью формировать эмульсии с водой. Это свойство лецитина может существенно изменять фазовый состав цементного камня в процессе его твердения. Эмульсии, создаваемые лецитином, способствуют более равномерному распределению воды в бетонной смеси, что в свою очередь может повысить прочностные характеристики формирующегося цементного камня.

Эмульгирующие свойства лецитина играют ключевую роль в процессах гидратации цемента получаемых образцов. При добавлении лецитина происходит упрочнение цементной смеси, за счёт изменения растворимости клинкерных минералов, а соответственно более эффективному образованию и росту кристаллических структур. Кроме того, благодаря эмульсионной активности лецитина, удается контролировать пористость и микроструктуру цементного материала, что важно для его прочностных и эксплуатационных свойств.

Механизмы влияния лецитина на свойства цементного камня могут быть связаны с его химической структурой и взаимодействием с компонентами цементного состава. Мы предполагаем, что компоненты лецитина могут напрямую способствовать ускорению процесса гидратации цемента, связывая продукты гидратации, такие как гидроксид кальция, что способствует смещению равновесия в сторону образования продуктов гидратации. Исследуемые добавки также могут выступать в роли активаторов гидратации цементных компонентов, способствуя быстрому началу и более полному протеканию гидратационных реакций. Это может приводить к более плотной и прочной структуре цементного материала.

Также компоненты лецитина могут влиять на формирование микроструктуры цементного камня, способствуя уменьшению размеров пор и повышению компактности материала. Это в свою очередь может улучшать его механические свойства, такие как прочность и устойчивость к воздействию внешних факторов. Подобным образом добавки могут способствовать и появлению новых минеральных образований, которые могут быть обнаружены при исследовании методами рентгеновской дифрактометрии, в качестве новых фаз.

Прочностные характеристики образцов были исследованы на электронном прессе «РЭМ-

100-А-1-1», страна изготовления Россия. По полученным результатам были построены графики

зависимости прочности от массовой доли исследуемой добавки (рис. 1).

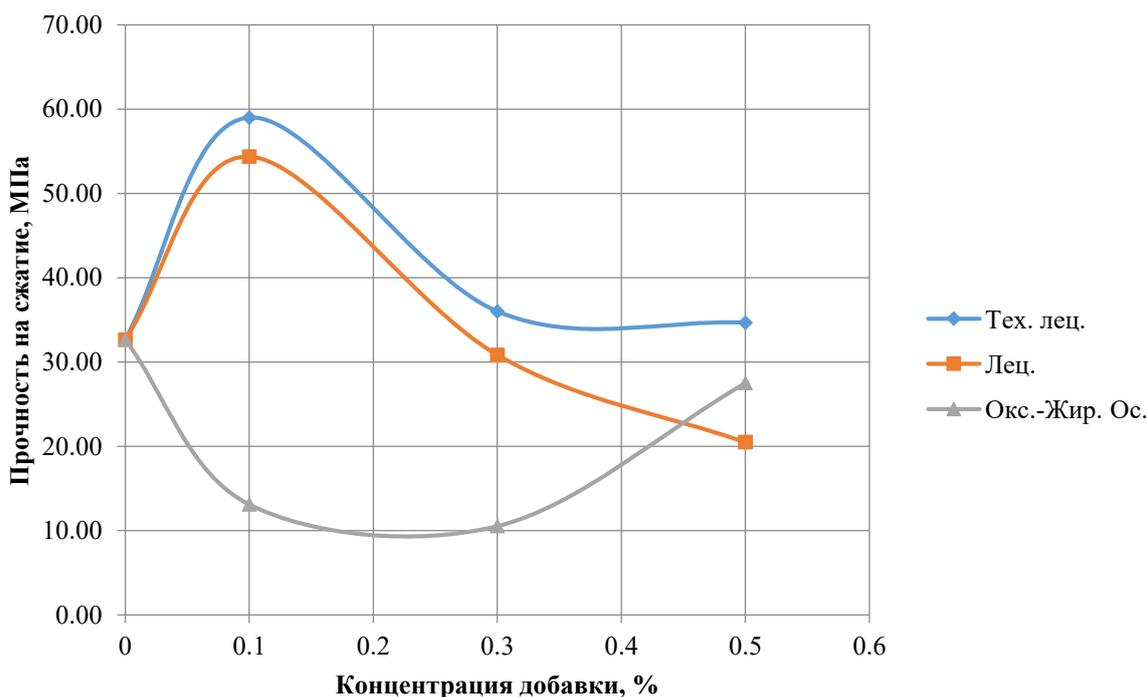


Рис. 1. Зависимость относительной прочности от концентрации добавок

Как видно из полученных данных, наиболее результативными образцами стали технический лецитин и соевый лецитин, которые имеют аналогичные картины набора прочностных характеристики, достигая отметки 54,37 МПа, в случае исходного лецитина, причём отход способствует даже более интенсивному набору прочности в 59,00 МПа, что почти в два раза больше исходной прочности контрольного образца цементного камня, сделанного из тампонажного цемента. Это небольшая разница может объясняться экстракцией веществ из соевого лецитина мешающих набору прочности цементной композиции. При повышении концентрации добавки технического лецитина до 0,3 % от массы композиции прочность на сжатие снижается до 36,00 МПа с техническим лецитином и до 30,84 МПа с необработанным соевым лецитином, что сравнимо с прочностью контрольного образца. С повышением концентрации добавок до 0,5 % прочностные характеристики бетонов с добавкой технического лецитина практически не меняются относительно контрольного образца, а с добавкой соевого лецитина теряют прочность, что можно объяснить преодолением барьера концентрации органической добавки, о которой говорили исследователи в данной работе [16].

Добавка на основе оксалатно-жирного осадка в концентрациях 0,1 % и 0,3 % кардинально мешает набору прочности цементной

композиции, уменьшая её до значений в 13,09 и 10,52 МПа, соответственно. Однако с повышением концентрации до 0,5 % прочностные характеристики улучшаются относительно более низких концентраций, предположительно из-за увеличения оксалата натрия в композиции, но всё равно не достигают даже значений контрольного образца.

Наиболее прочные образцы были размолоты в ступке и исследованы с использованием рентгеновского дифрактометра, на предмет изменения фазового состава образцов по сравнению со стандартом (рис. 2).

По результатам анализа порошковой рентгеновской дифрактограммы стандартного образца были выявлены фазы: портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -d, $\text{\AA} = 4,917; 3,113; 2,631; 1,927; 1,797$ и гиролит $2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{d}$, $\text{\AA} = 2,31; 2,18; 1,82$. Также отмечено присутствие пиков негидратированной фазы, таких как алит $\text{\AA} = 2,780; 2,185$, белит $\text{\AA} = 2,780; 2,292; 2,185$, четырехкальциевый алюмоферрит $\text{\AA} = 2,631; 2,047; 1,927$. На рентгенограмме зафиксировано диффузионное гало в области $2\theta = 10 - 25$ град., которое характеризует наличие рентгеноаморфных веществ, в частности, гидросиликатов кальция и тоберморитового геля.

На порошковой рентгеновской дифрактограмме образца цементного камня с добавкой 0,1 % необработанного соевого лецитина от

массы композиции пики более узкие, что свидетельствует о высококристаллической структуре исследуемого образца. Интенсивность пиков портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -d, $\text{\AA} = 4,922; 2,631; 1,931$ ниже у исследуемого образца, однако также менее интенсивны пики негидратированной фазы

алита $\text{\AA} = 3,036; 2,969; 2,776; 2,608; 2,161; 1,539$, белита $\text{\AA} =$, алюмоферита, также отчётливо обнаруживаются пики фазы окенита $3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} - \text{d}$ $\text{\AA} = 20,741; 8,898; 6,727; 3,893; 2,969; 1,798$, что предположительно и даёт значимый вклад в прочность образца.

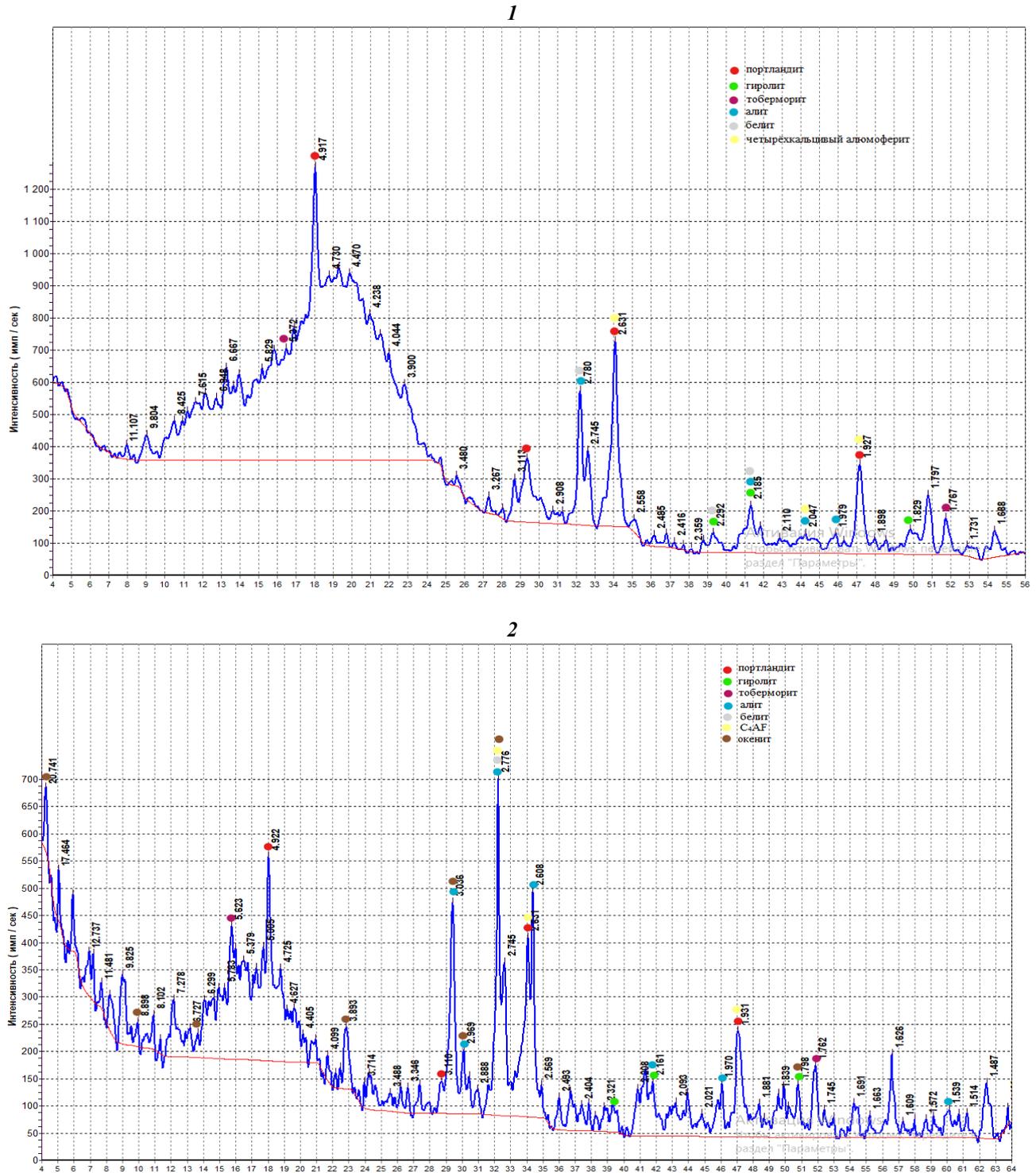
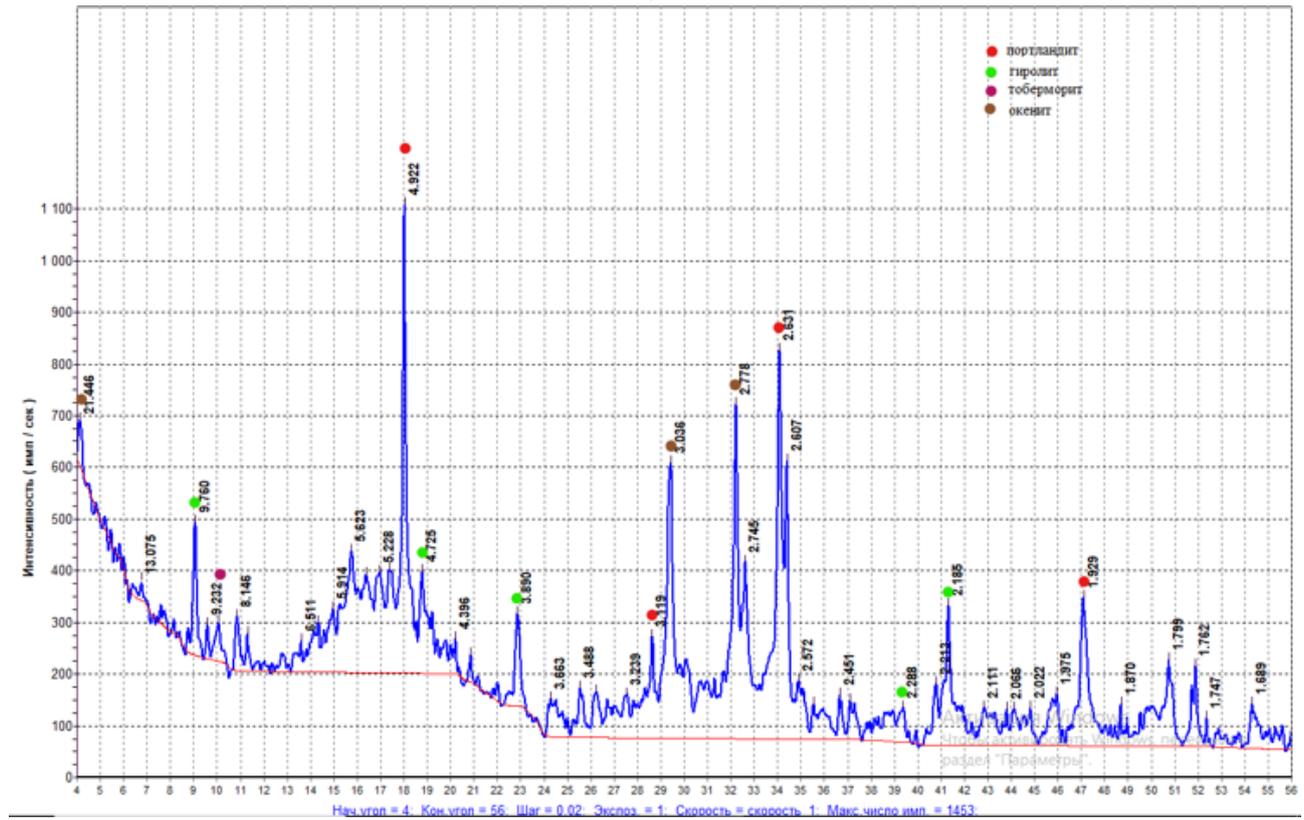


Рис. 2. Порошковые рентгеновские дифрактограммы образцов цементного камня (начало):
 1 – контрольный образец;
 2 – состав с добавкой 0,1 % лецитина;

3



4

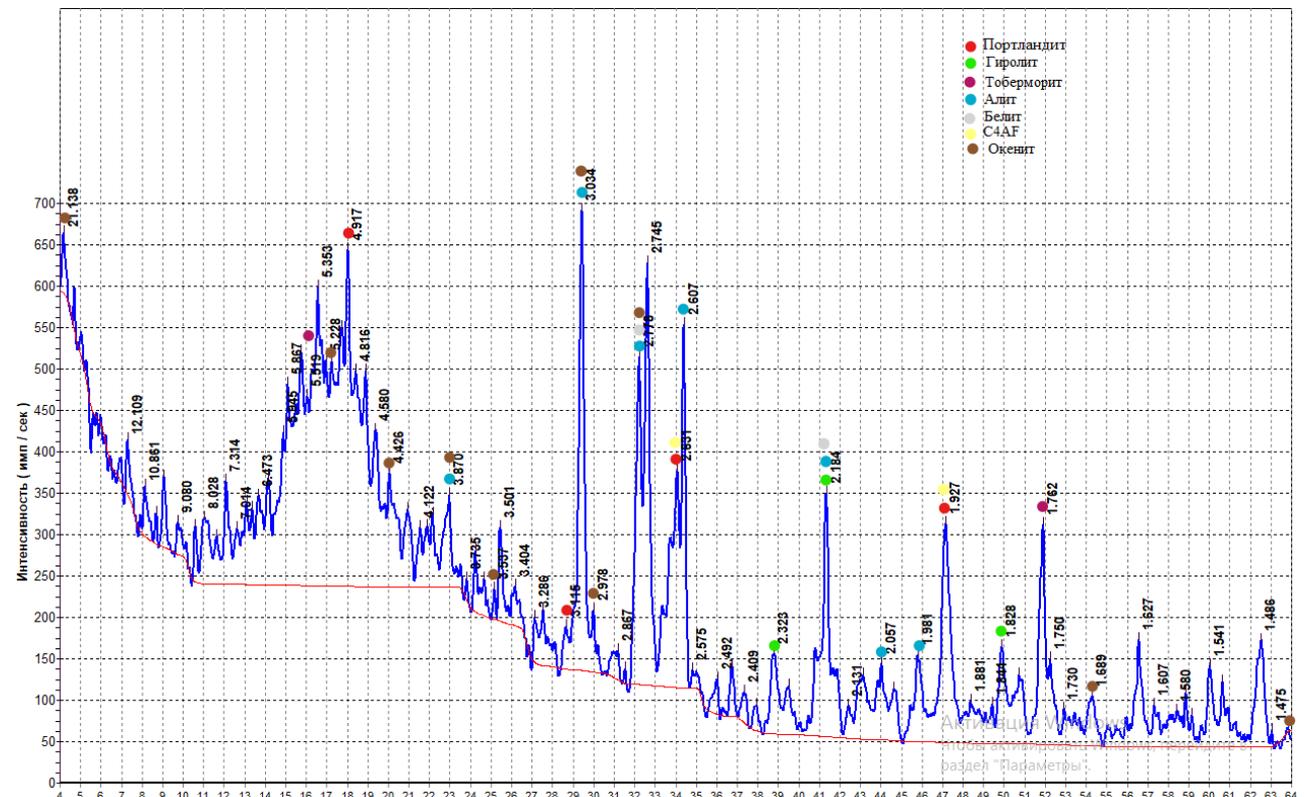


Рис. 2. Порошковые рентгеновские дифрактограммы образцов цементного камня (окончание):
 3 – состав с добавкой 0,1 % технического лецитина;
 4 – состав с добавкой 0,5 % оксалатно-жирного осадка

В образцах цементного камня из тампонажного цемента с добавкой 0,1 % технического лецитина от массы композиции пики также чётко различимы и оформлены, что также говорит о высококристаллической структуре полученного образца. Что важно, пики портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -d, Å = 4,922; 3,119; 2,631; 1,929 и гиролита $2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – d, Å = 9,760; 4,725; 3,890; 2,185, довольно интенсивные, сравнимы с контрольным образцом. Также появляются отчётливые пики фазы окенита $3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – d Å = 21,446; 3,036; 2,778. Пики негидратированной фазы менее и интенсивны, чем в прошлом образце с добавкой необработанного соевого лецитина, и, возможно, перекрываются пиками окенита.

В образцах цементного камня с добавкой эмульсии оксалатного осадка с концентрацией 0,5 % от массы композиции помимо вышеуказанных фаз негидратированных минералов портландцементного клинкера были обнаружены дифракционные максимумы окенита ($3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) – d, Å = 21,13; 5,23; 4,42; 3,87; 3,54; 2,98; 1,69; 1,48. Портландит представлен меньшим количеством линий дифракционных максимумов по сравнению с контрольным составом, и их интенсивность значительно ниже интенсивности остальных образцов и контрольного образца: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -d, Å = 4,92; 3,03; 2,83; 1,92.

Выводы. В ходе данной работы были исследованы прочностные характеристики и фазовый состав цементного камня с добавлением соевого лецитина, технического лецитина отхода производства изолированных фосфолипидов. Результаты исследования показали, что добавление соевого лецитина и технического лецитина в концентрации до 0,1 % от общей массы композиции приводит к значительному увеличению прочности цементного камня. Анализ порошковых рентгенограмм продемонстрировал увеличение интенсивности пиков продуктов гидратации цемента, повышение кристалличности образца и появление новой фазы окенита. Эти изменения в фазовом составе цементного камня объясняют улучшение его прочностных характеристик.

Также изучено влияние добавки на основе оксалатно-жирового осадка. Данная присадка мешает набору прочности образцам, что подтверждается порошковыми рентгенограммами, на которых отчётливо видно снижение интенсивности и уменьшение количества линий дифракционных максимумов продуктов гидратации цемента.

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности использования технического лецитина для улучшения характеристик цементных материалов. Это может способствовать не только повышению прочности

строительных конструкций, но и решению проблемы утилизации отходов производства лецитина, что имеет важное экологическое значение. Применение таких добавок может снизить себестоимость производства цементных композиций и увеличить их долговечность.

Тем не менее, было установлено, что при увеличении концентрации лецитина свыше 0,1 % наблюдается снижение прочностных характеристик цементного камня, что, вероятно, связано с увеличением пористости материала. Это указывает на необходимость дальнейших исследований для оптимизации дозировки добавки и изучения её влияния на другие свойства цементного камня, такие как усадка, морозостойкость и водопоглощение.

План дальнейших исследований включает более детальное изучение механизма взаимодействия лецитина с цементным материалом на микроскопическом уровне, использование различных методов анализа, таких как сканирующая электронная микроскопия и термогравиметрический анализ, а также проведение долговременных испытаний прочности и долговечности цементных композиций с добавлением лецитина. Также планируется исследовать влияние лецитина в сочетании с другими органическими и неорганическими добавками, что может открыть новые перспективы для создания высокоэффективных строительных материалов.

Таким образом, результаты проведённого исследования подтверждают перспективность использования технического лецитина в качестве модифицирующей добавки для цементных композиций, однако для полного понимания и оптимизации данного процесса необходимо проведение дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Викторова Е.П., Лисовая Е.В., Свердличенко А.В., Жане М.Р. Влияние особенностей химического состава модифицированных лецитинов на их поверхностно-активные и эмульгирующие свойства // Новые технологии. 2023. Том 19. № 3. С. 48–57.
2. Михалко И.К. Использование промышленных отходов в производстве цемента // Природоресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции, Пенза, 24–25 января 2019 года. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет. 2019. С. 123–129.
3. Ткач Е.В., Семенов В.С., Ткач С.А. Исследование влияния органоминеральной добавки на

эксплуатационные свойства мелкозернистого бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 16–19.

4. Боцман Л.Н., Ищенко А.В., Антонова Р.О. Гидрофобизирующие добавки на основе различных отходов // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Том III. Алушта: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 11–15.

5. Дуйсебаева С.Т. Исследование влияния химических добавок на свойства экологичного бетона с коллагеновым наполнителем // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2017. № 2(101). С. 13–17.

6. Иманов М.О., Иманов Е.К. Гранулированная гидрофобно-пластифицирующая добавка на основе отходов промышленности // Труды университета. 2017. № 1(66). С. 62–65.

7. Пупынина В.Д., Сидоров Н.А. Эффект автоактивизации гидрофобизированных цементов при хранении // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2019 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. С. 2585–2588.

8. Патент № 2209792 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/02, С04В 24/06. Добавка для бетонной смеси: № 2002100630/03 / В.Н. Махлай, С.В. Афанасьев, В.И. Герасименко, С.С. Сабитов. ; заявл. 16.01.2002; опубл. 10.08.2003 5 с.

9. Мечай А.А., Барановская Е.И., Гончар А.Н. Применение органических добавок комплексного действия в технологии автоклавного ячеистого бетона // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 10-й международной научно-практической конференции. Минск: Издатель А.Н. Вараскин, 2018. С. 74–77.

Информация об авторах

Харламов Владимир Александрович, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: wladimir.harlamov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лопанов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: alorpanov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дементьев Константин Владимирович, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: kdementev910@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Павел Ильич Сысоев, кандидат химических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: susoev.pavel@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

10. Хорохордин А.М., Рудаков Я.О., Перцев В.Т. Черепахина Р.Г., Рудаков О.Б. Применение шлам-лигнина гашеного известью в качестве добавки в бетон // Химия, физика и механика материалов. 2021. № 2(29). С. 90–97.

11. Барановская Е.И., Мечай А.А., Довжик Н.С., Колпащиков В.Л. Исследование влияния органических добавок на основе поликарбонатного лигнина на реологические свойства ячеистобетонных смесей // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2018. №2 (211). С. 77–82.

12. Патент № 2072971 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 22/06, С04В 24/04. добавка для бетонной смеси: № 93015448/04; заявл. 24.03.1993; опубл. 10.02.1997 / Ю.П. Гладких, В.И. Завражина, В.В. Ядыкина. заявл. 24.03.1993; опубл. 10.02.1997 5 с.

13. Белоус Н.Х., Кошевар В.Д., Родцевич С.П., Тавгень В.В. Влияние комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на свойства портландцементных мелкозернистых бетонов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2013. № 2. С. 111–116.

14. Харламов В.А., Дементьев К.В., Лопанов А.Н., Сысоев П.И. Использование обеднённого лецитина как добавку, повышающую прочность бетона // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология. Сборник докладов международной научной конференции. Белгород. 2023. С. 250–252

15. Кирсанова А.А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные комплексными добавками, включающими метакаолин / А.А. Кирсанова: дис. канд. техн. наук. Томск, 2015. 163 с.

16. Тараканов О.В., Пронина Т.В., Тараканова Е.О. Применение комплексных добавок для повышения прочности бетона // Популярное бетоноведение. 2008. №. 4. С. 26–29.

Поступила 09.07.2024 г.

© Харламов В.А., Лопанов А.Н., Дементьев К.В., Сысоев П.И., 2024

***Kharlamov V.A., Lopanov A.N., Dementyev K.V., Sysoev P.I.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: wladimir.harlamov@mail.ru*

MODIFICATION OF CONCRETE FROM GROUTING CEMENT WITH ADDITIVES BASED ON LECITHIN EXTRACTION WASTE

Abstract. *In the course of this work, the strength characteristics and phase composition of cement stone made from grouting cement with the addition of lecithin extraction waste were investigated. It has been established that an additive based on technical lecithin in a concentration of up to 0.1% contributes to a significant increase in the strength characteristics of the cement material. By analyzing powder X-ray diffraction patterns of cement stone with the addition of technical lecithin, an increase in the intensity of the peaks of cement hydration products and an increase in the crystallinity of the sample were revealed. The appearance of a new phase of okenite is also observed, which can have a positive effect on the strength of the material. When the additive concentration increases above 0.1%, a decrease in strength characteristics is observed, presumably due to an increase in the porosity of the cement stone. The study showed that the optimal concentration of technical lecithin to improve strength properties is 0.1%. The results of this study suggest that the use of lecithin extraction waste as an additive in cement compositions may be an effective way to recycle this waste while improving the properties of the cement material. Further research will be aimed at optimizing the composition of additives and studying their long-term effect on the performance characteristics of cement compositions.*

Keywords: *grouting cement, additives, lecithin, waste*

REFERENCES

1. Viktorova E.P., Lisovaya E.V., Sverlichenko A.V., Zhane M.R. Influence of the characteristics of the chemical composition of modified lecithins on their surface-active and emulsifying properties [Vliyanie osobennostej himicheskogo sostava modifitsirovannykh lecitinov na ih poverhnostno-aktivnye i emul'giruyushchie svoystva]. *New technologies*. 2023. Volume 19. No. 3. Pp. 48–57. (rus)

2. Mikhalko I.K. Use of industrial waste in cement production [Ispol'zovanie promyshlennykh othodov v proizvodstve tsementa]. *Natural resource potential, ecology and sustainable development of Russian regions: Collection of articles of the XVII International Scientific and Practical Conference, Penza, January 24–25, 2019*. Penza: Penza State Agrarian University. 2019. Pp. 123–129. (rus)

3. Tkach E.V., Semenov V.S., Tkach S.A. Study of the influence of organomineral additives on the operational properties of fine-grained concrete [Issledovanie vliyaniya organomineral'noj dobavki na ekspluatatsionnye svoystva melkozernistogo betona]. *Industrial and Civil Construction*. 2013. No. 9. Pp. 16–19. (rus)

4. Botsman L.N., Ishchenko A.V., Antonova R.O. Hydrophobizing additives based on various wastes [Gidrofobiziruyushchie dobavki na osnove razlichnykh othodov]. *Innovative ways to solve current problems of environmental management and environmental protection: Materials of reports of the International Scientific and Technical Conference,*

Volume III. Alushta: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2018. Pp. 11–15. (rus)

5. Duysebaeva S.T. Study of the influence of chemical additives on the properties of environmentally friendly concrete with collagen filler [Issledovanie vliyaniya himicheskikh dobavok na svoystva ekologichnogo betona s kollagenovym napolnitelem]. *Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaeva*. 2017. No. 2(101). Pp. 13–17. (rus)

6. Imanov M.O., Imanov E.K. Granulated hydrophobic-plasticizing additive based on industrial waste [Granulirovannaya gidrofobno-plastifitsiruyushchaya dobavka na osnove othodov promyshlennosti]. *Proceedings of the University*. 2017. No. 1(66). Pp. 62–65. (rus)

7. Pupynina V.D., Sidorov N.A. Effect of autoactivation of hydrophobized cements during storage [Effekt avtoaktivizatsii gidrofobizirovannykh cementov pri hranenii]. *International scientific and technical conference of young scientists of BSTU*. V.G. Shukhova, Belgorod, May 01–20, 2019. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova, 2019. Pp. 2585–2588. (rus)

8. Makhlai V.N., Afanasyev S.V., Gerasimenko V.I., Sabitov S.S. Additive for concrete mixture. No. 2002100630/03. Patent RF no. 2002100630/03, 2003.

9. Mechai A.A., Baranovskaya E.I., Gonchar A.N. Application of organic additives of complex action in the technology of autoclaved cellular concrete

[Primenenie organicheskikh dobavok kompleksnogo dejstviya v tekhnologii avtoklavnogo yacheistogo betona]. Experience in the production and application of autoclaved cellular concrete: materials of the 10th international scientific and practical conference. Minsk: Publisher A. N. Varaskin, 2018. Pp. 74–77. (rus)

10. Khorokhordin A.M., Rudakov Ya.O., Pertsev V.T. Cherepakhina R.G., Rudakov O.B. Application of slaked lime sludge lignin as an additive in concrete [Primenenie shlam-lignina gashenogo izvest'yu v kachestve dobavki v beton]. Chemistry, physics and mechanics of materials. 2021. No. 2(29). Pp. 90–97. (rus)

11. Baranovskaya E.I., Mechai A.A., Dovzhik N.S., Kolpashchikov V.L. Study of the influence of organic additives based on polycarboxylate lignin on the rheological properties of cellular concrete mixtures [Issledovanie vliyaniya organicheskikh dobavok na osnove polikarboksilatnogo lignina na reologicheskie svoystva yacheistobetonnykh smesey]. Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology. 2018. No. 2 (211). Pp. 77–82. (rus)

12. Gladkikh Y.P., Zavrazhina V.I., Yadykina V.V. Additive for concrete mixture. Patent RF. No. 93015448/04, 1997.

13. Belous N.Kh., Koshevar V.D., Rodtsevich S.P., Tavgen V.V. Influence of a complex hydrophobic-plasticizing additive on the properties of Portland

cement fine-grained concrete [Vliyanie kompleksnoj gidrofobno-plastificiruyushchej dobavki na svoystva portlandcementnykh melkozernistykh betonov]. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Sciences Series. 2013. No. 2. Pp. 111–116. (rus)

14. Kharlamov V.A., Dementyev K.V., Lopanov A.N., Sysoev P.I. The use of depleted lecithin as an additive that increases the strength of concrete [Ispol'zovanie obednyonnogo lecitina kak dobavku, povyshayushchuyu prochnost' betona]. Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology. Collection of reports of the international scientific conference. Belgorod. 2023. Pp. 250–252. (rus)

15. Kirsanova A.A. Highly functional heavy concretes modified with complex additives including metakaolin [Vysokofunkcional'nye tyazhelye betony, modifitsirovannye kompleksnymi dobavkami, vkluchayushchimi metakaolin]. dis. cand. tech. Sci. Tomsk, 2015. 163 p. (rus)

16. Tarakanov O.V., Pronina T.V., Tarakanova E.O. Application of complex additives to increase the strength of concrete [Primenenie kompleksnykh dobavok dlya povysheniya prochnosti betona]. Popular concrete science. 2008. No. 4. Pp. 26–29. (rus)

Information about the authors

Kharlamov, Vladimir A. Graduate student of the Department of Life Safety. E-mail: wladimir.harlamov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Loponov, Alexander N. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Life Safety. E-mail: alopanov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dementyev, Konstantin V. Graduate student of the Department of Life Safety. E-mail: kdementev910@gmail.com. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sysoev, Pavel I. Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety. E-mail: susoev.pavel@gmail.com. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 09.07.2024

Для цитирования:

Харламов В.А., Лопанов А.Н., Дементьев К.В., Сысоев П.И. Модификация бетонов из тампонажного цемента добавками на основе отходов экстракции лецитина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 92–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-92–101

For citation:

Kharlamov V.A., Lopanov A.N., Dementyev K.V., Sysoev P.I. Modification of concrete from grouting cement with additives based on lecithin extraction waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 92–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-92-101

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-102-25

Дуюн И.А., Кабальянц П.С., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: duyun77@mail.ru*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ СТЮАРТА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Аннотация. В статье представлена интеллектуальная система управления платформой Стюарта, являющейся механизмом параллельной кинематики с шестью степенями свободы. Основным недостатком таких механизмов является наличие особых положений рабочей области, в которых может произойти потеря устойчивости. Стандартные алгоритмы управления часто оказываются неэффективными при прохождении через потенциально нестабильные зоны, поэтому в качестве основного компонента предлагаемой системы управления выбран метод обучения с подкреплением (Reinforcement Learning), относящийся к виду машинного обучения. Выбор обусловлен эффективностью работы метода в непрерывных пространствах действий, что особенно важно для системы управления, обеспечивающей плавное движение в пределах рабочей области с переменными координатами. В условиях действия эксплуатационных нагрузок, вибраций и температурных колебаний необходима коррекция в реальном времени. Применение искусственной нейронной сети повысит точность и гибкость для адаптации к меняющимся условиям эксплуатации без снижения производительности на основе моделирования сложных нелинейных зависимостей и обучения с использованием накопленного опыта. Представлены следующие аспекты системы управления: схема работы и общая архитектура реализации метода обучения с подкреплением, схема алгоритма обучения, UML-диаграмма классов среды и агента, архитектура сети Актоар и Критика, процесс обучения сети и результаты ее тестирования, которые показали высокую эффективность ее применения.

Ключевые слова: платформа Стюарта, обучение с подкреплением, нейронные сети, параллельная кинематика, интеллектуальная система управления, симуляция в PyBullet

Введение. Современные производственные отрасли и другие сферы активно внедряют механизмы, основанные на параллельной кинематике. В таких механизмах выходное звено приводится в движение посредством нескольких кинематических цепей, что позволяет суммировать их степени свободы. В отличие от машин с последовательной кинематикой, такие устройства обеспечивают более высокую точность и грузоподъемность [1-5]. Благодаря параллельной кинематике эти механизмы имеют ряд эксплуатационных преимуществ: высокая жесткость конструкции при небольшом весе, простота сборки и масштабирования, хорошие динамические характеристики, высокая скорость и ускорение [6-10].

Механизмы параллельной кинематики используют в станкостроении, аэрокосмической области, в качестве координатно-измерительных машин, манипуляторов и подвижных тренажеров. Роботы-станки позволяют осуществлять высокоточную обработку деталей сложной геометрии, синхронную пятиосевую обработку, а также высокоскоростное фрезерование твердых материалов, обеспечивая более высокую производительность по сравнению с традиционными станками. Координатно-измерительные машины с параллельной кинематикой широко применяются

для точных измерений сложных пространственных форм. Конструкция таких машин представляет собой перевернутую пирамиду с основанием из сферических шарниров, которые служат точками отсчета для системы лазерных интерферометров, благодаря чему достигается высокая точность измерений. В аэрокосмической отрасли механизмы параллельной кинематики являются перспективным решением задач высокоточного позиционирования антенн в телескопах нового поколения. Роботизированные манипуляторы, использующие параллельную кинематику, находят широкое применение в погрузочно-разгрузочных работах, автоматизированных складах и сборочных линиях, особенно в производстве микропроцессорной техники. Подвижные тренажеры, построенные на основе параллельной кинематики, становятся все более популярными для обучения пилотов и водителей. Их главное преимущество перед неподвижными тренажерами заключается в возможности моделирования динамики реального движения [1-3].

Платформа Гью-Стюарта представляет собой современный этап развития механизмов параллельной структуры и относится к классу гексаподов, что предполагает наличие шести степеней свободы. Выходное звено (подвижная плат-

форма) перемещается относительно неподвижного основания по шести независимым координатам с помощью приводов линейных перемещений, движение обеспечивается шестью телескопически соединенными звеньями. Платформа способна перемещаться и вращаться вокруг трех координатных осей, что и обеспечивает ей шесть степеней свободы. Типовая конструкция платформы Стюарта с шестью степенями свободы представлена на рис. 1.

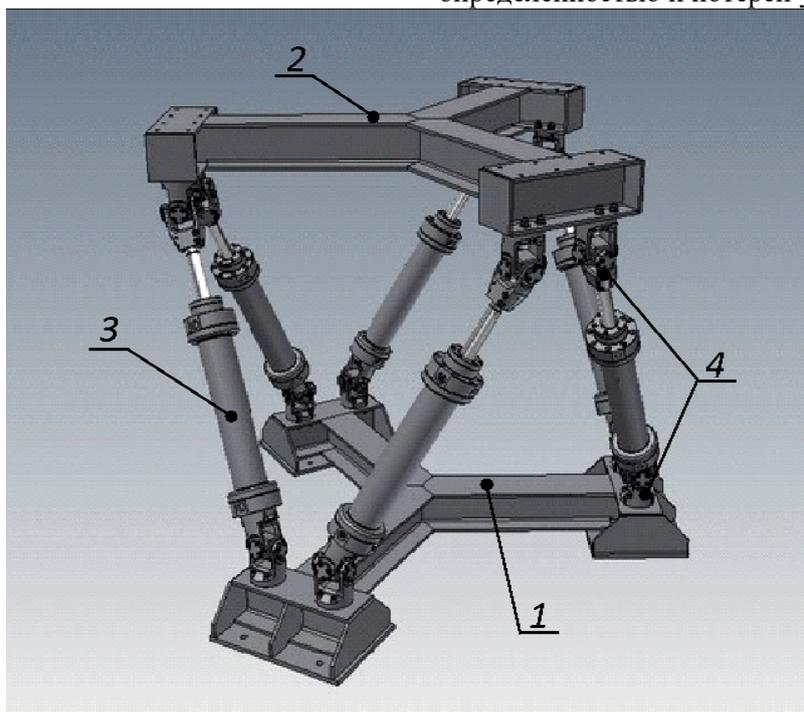


Рис. 1. Конструкция платформы Гью-Стюарта, основные механические компоненты: 1 – основание; 2 – подвижная платформа; 3 – электроцилиндры; 4 – шарниры

Планирование движения параллельного манипулятора предполагает решение прямой задачи кинематики, которая заключается в определении координат рабочего органа на основе длин выдвижения штоков, и обратной задачи кинематики — вычисления длин штоков по заданным координатам рабочего органа. Для решения этих задач традиционно применяются аналитические и численные методы. Однако в ситуациях с высокими требованиями к точности и быстродействию эти методы могут оказаться недостаточно эффективными. Под действием рабочей нагрузки, вибраций и температурных колебаний точность позиционирования может существенно снижаться. В таких условиях необходима коррекция в реальном времени, что требует от системы управления не только высокой точности, но и достаточной гибкости для адаптации к меняющимся условиям эксплуатации без снижения производительности [5, 6].

Однако, несмотря на многочисленные преимущества, механизмы параллельной кинематики имеют определенные недостатки. Нелинейные зависимости кинематики и динамики от положения выходного звена в рабочей области создают анизотропию и неоднородность в динамических, упругих и скоростных характеристиках. Кроме того, существует риск интерференции, то есть пересечения кинематических цепей, что может обуславливать возникновение особых положений, характеризующихся геометрической неопределенностью и потерей устойчивости [3, 4].

Традиционные методы управления параллельными манипуляторами, как правило, опираются на классическую теорию управления и принципы аналитической механики, применяются линейные и нелинейные алгоритмы программирования, а обратная связь реализуется с помощью пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов. Основное преимущество такого подхода заключается в его надежности и предсказуемости, он эффективен для выполнения производственных задач, требующих точного воспроизведения повторяющихся траекторий и движений в детерминированных условиях. Однако, в динамически изменяющихся или неопределенных условиях управление становится сложнее, так как необходимо учитывать множество внешних и внутренних факторов. Поэтому традиционные системы управления не всегда могут справиться с задачей поддержания устойчивости механизма в сложных эксплуата-

ционных условиях. Это связано с их неспособностью компенсировать динамические и кинематические нагрузки, что негативно сказывается на эффективности и надежности работы, особенно в роботизированных системах, где требуется высокая точность позиционирования. В таких случаях целесообразно использовать искусственные нейронные сети, способные моделировать сложные нелинейные зависимости и обучаться на основе накопленного опыта, что повышает точность и адаптивность системы управления [11, 12].

Одна из наиболее сложных задач — это управление манипулятором в зонах сингулярности. Стандартные алгоритмы управления часто оказываются неэффективными при прохождении через потенциально нестабильные области, что может привести к потере точности и снижению надежности работы. Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных с датчиков в реальном времени и адаптивной коррекции траектории движения позволяет обходить зоны сингулярности, значительно повышая эффективность и надежность отработки заданной траектории.

Рассмотрим современные подходы к решению проблем управления механизмами параллельной кинематики. В статье Мерле [13] предложен алгоритм для решения прямой задачи кинематики параллельного манипулятора Гофа с использованием интервального анализа. Этот метод рассматривает интервальные неопределенности как целостные объекты, что позволяет применять к ним арифметические и аналитические операции. Однако в условиях реального времени этот метод может оказаться слишком ресурсоемким, особенно по сравнению с нейронными сетями, которые способны быстрее и адаптивнее обрабатывать данные и учитывать неопределенности. Даш [14] в своей работе использует метод Денавита-Хартенберга и векторный анализ для решения обратной задачи кинематики манипулятора. Этот подход эффективен в условиях предсказуемой среды, но имеет ограничения в условиях динамически изменяющихся параметров, где учет множества стохастических факторов становится проблематичным. Нелинейности системы усложняют кинематический анализ и увеличивают время вычислений, что требует значительных усилий для точной настройки. В исследовании Виейры и соавторов [15] рассматривается метод планирования движения параллельных манипуляторов с использованием моделирования Монте-Карло. Авторы предлагают модель, в которой нейронные сети компенсируют вычислительные ограничения метода Монте-Карло,

прогнозируя вероятность отказа механизма в различных точках рабочей области. Однако данный подход тестировался только на манипуляторе 3RRR с тремя степенями свободы и не апробирован для более сложных механизмов, таких как платформа Стюарта. В работе предложено адаптивное нейронное управление параллельным манипулятором аэрокосмического применения. Система управления на основе нейронных сетей обеспечивает высокую точность позиционирования и ориентации манипулятора в условиях работы в открытом космосе.

Таким образом, внедрение элементов искусственного интеллекта и машинного обучения в систему управления параллельными манипуляторами является перспективным направлением, так как позволяет существенно повысить точность позиционирования, оптимизировать управление в реальном времени и обеспечить самообучение системы, это особенно важно в сферах, где ошибки могут иметь серьезные последствия.

Основная часть. В качестве основного компонента предлагаемой системы управления выбран метод обучения с подкреплением (Reinforcement Learning), который использован для создания и обучения нейронной сети, управляющей платформой Стюарта. Выбор DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) обусловлен его эффективностью в непрерывных пространствах действий, что особенно важно для разработки системы управления, обеспечивающей плавное движение платформы в пределах рабочей области с переменными координатами. Этот подход является одним из видов машинного обучения и основывается на взаимодействии двух основных компонентов: агента и среды (рис. 2) [16–18].

В качестве компонента среды выступает симуляционная модель платформы Стюарта, реализованная в PyBullet, который выбран в связи с тем, что он позволяет моделировать кинематику и динамику при движении платформы, предоставляя агенту реалистичную среду для обучения и тестирования.

Агент (нейронная сеть) принимает решения на основе текущего состояния среды (платформы), изменяя длины актуаторов для достижения заданного положения в рабочем пространстве. Агент взаимодействует со средой посредством двух элементов: состояния и действия. Состояние представляет собой текущее координатное положение платформы относительно рабочей области и выражается вектором, который включает три координаты по трем координатным осям и три угла Эйлера. Агент использует это состояние для принятия решений о следующих действиях.

Действие представляет собой изменение длины актуаторов платформы, которое в свою очередь приводит к изменению положения и ориентации платформы. Таким образом агент обучается выбирать такие изменения длин актуаторов, которые минимизируют отклонение от заданной траектории движения.

Элементы состояния и действия взаимодействуют между собой посредством двух других

элементов – вознаграждения и штрафов. Вознаграждение является ключевым элементом процесса обучения. Агент получает вознаграждения за точное достижение целевых позиций, а также штрафы за ошибки или отклонения. Вознаграждение рассчитывается на основе отклонения текущего состояния платформы от целевого состояния, с учетом точности позиционирования.

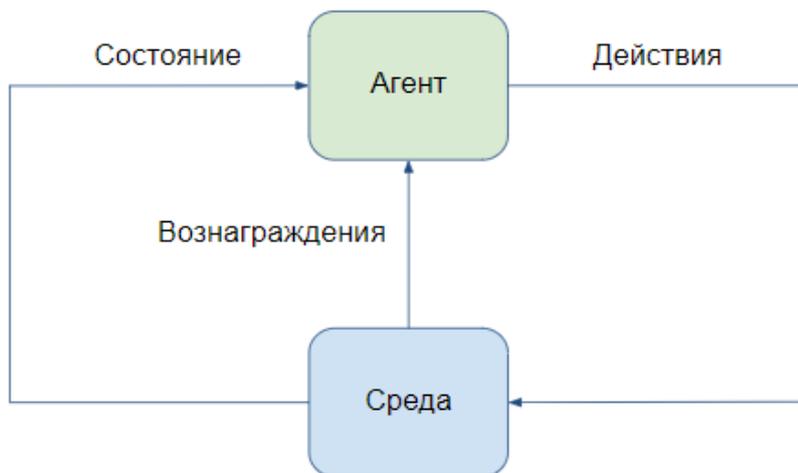
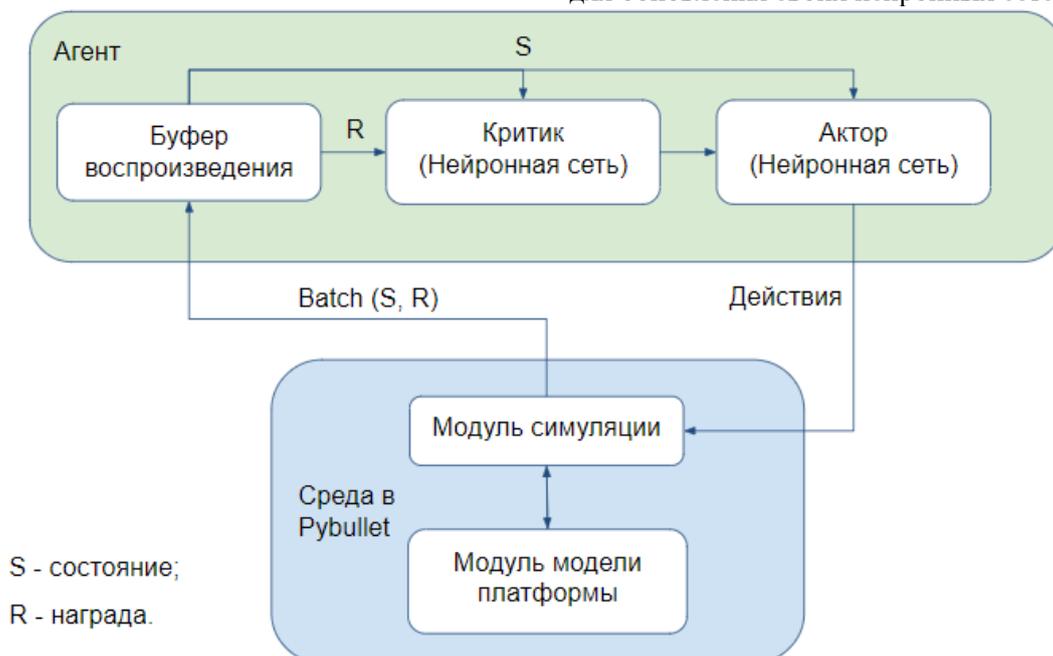


Рис. 2. Схема работы метода обучения с подкреплением

На рис. 3 представлена архитектура взаимодействия агента и среды. Агент состоит из следующих трех ключевых компонентов: Буфер воспроизведения, Критик и Актор. В качестве Критика и Актора выступают две отдельные нейронные сети. Критик (нейронная сеть № 1) оценивает полезность действий агента, определяя, насколько хорошо данное действие способствует достижению цели. Актор (нейронная сеть № 2) определяет наилучшие действия на основе текущего состояния.

Буфер воспроизведения играет важную роль в процессе обучения агента. Он хранит историю взаимодействий агента со средой, включая состояния, действия, вознаграждения и новые состояния. Под состоянием здесь понимается определенное координатное положение платформы в пространстве рабочей области. Это позволяет агенту использовать прошлый опыт для обучения, обеспечивая более стабильное и эффективное обучение. Буфер воспроизведения используется для мини-батчей, которые агент использует для обновления своих нейронных сетей.



S - состояние;
R - награда.

Рис. 3. Общая архитектура реализации метода обучения с подкреплением

Среда, реализованная в PyBullet, состоит из двух основных модулей: модуля симуляции и модуля модели платформы. Модуль симуляции отвечает за имитационное моделирование взаимодействий агента с окружающей средой и виртуально реализует кинематику и динамику платформы. Модуль модели платформы представляет собой детализированную модель платформы Стюарта, описывающую её точные конструктивные характеристики: геометрические размеры всех элементов (неподвижного основания, подвижной платформы, актуаторов, штоков, шарниров), физико-механические параметры материалов. Модель платформы используется модулем симуляции для вычисления ответов системы

на действия агента, обеспечивая точное моделирование поведения платформы.

На рис. 4 представлена блок-схема алгоритма DDPG, которая отображает этапы взаимодействия агента со средой и процесс обновления моделей. Процесс обучения начинается с инициализации всех компонентов: создание симулятора платформы Стюарта на основе PyBullet, формирование моделей нейронных сетей для Актора и Критика, а также их целевых версий, инициализация буфера воспроизведения для хранения опыта агента. Этот подготовительный этап необходим для корректной работы всех компонентов в процессе обучения.

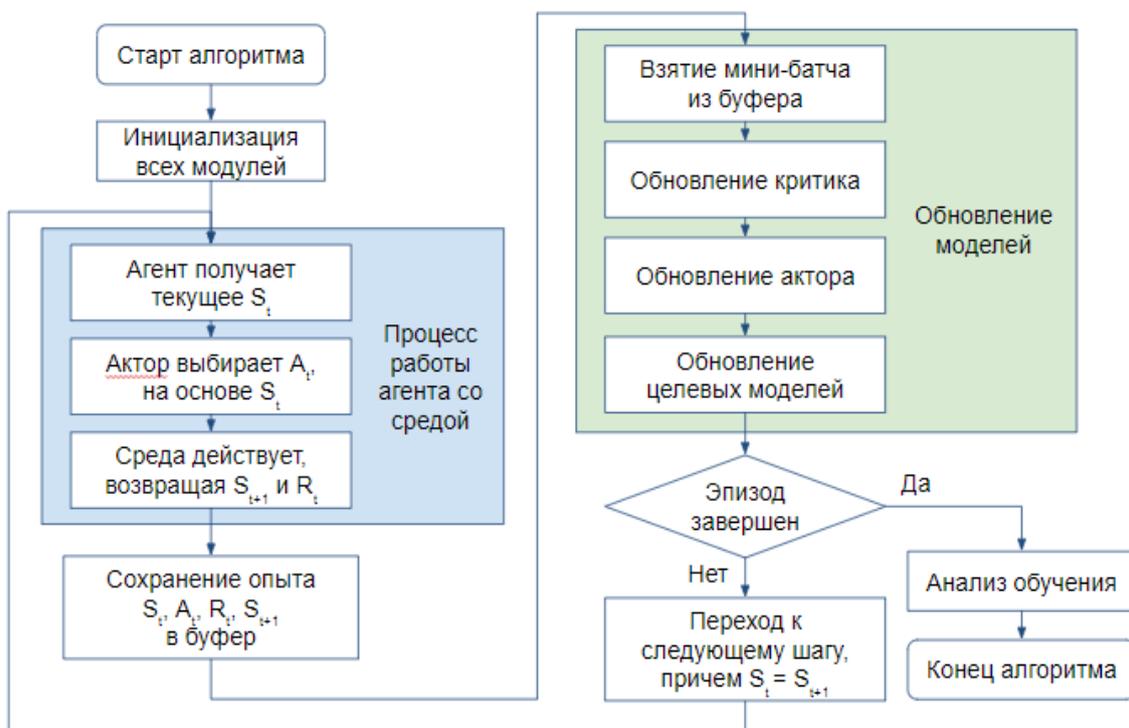


Рис. 4. Схема алгоритма обучения DDPG

Обучение состоит из множества эпизодов, каждый из которых включает два ключевых этапа: выбор начального и целевого состояний. В начале каждого эпизода агент выбирает случайное начальное положение платформы и задает фиксированную целевую позицию, которую платформа должна достичь. Далее агент взаимодействует со средой: Актор анализирует текущее состояние платформы и предсказывает действия, необходимые для достижения цели. Эти действия применяются к платформе, и симулятор обновляет её состояние. Взаимодействие агента с окружающей средой начинается с получения текущего состояния (S_t), что включает координатное положение платформы и информацию о длинах выдвижения актуаторов. Затем Актор выбирает действие (A_t) на основе текущего состояния, определяя, как изменять длины актуаторов плат-

формы. После выполнения действия симуляционная среда PyBullet обновляет состояние платформы, возвращая агенту новое состояние (S_{t+1}) и вознаграждение (R_t), которое оценивает эффективность действия. Следующий важный шаг — сохранение опыта. Данные (S_t , A_t , R_t , S_{t+1}) сохраняются в буфер воспроизведения, обеспечивая базу для последующего обучения. Затем происходит процесс обновления моделей Критика и Актора, который начинается после выполнения нескольких взаимодействий агента со средой. Этот процесс включает последовательные этапы: выбор мини-батча из буфера, обновление Критика, обновление Актора и синхронизацию целевых моделей.

На рис. 5 и 6 представлены классы, реализующие функционал среды и агента соответственно в виде UML-диаграммы, отражающей атрибуты и методы каждого класса.

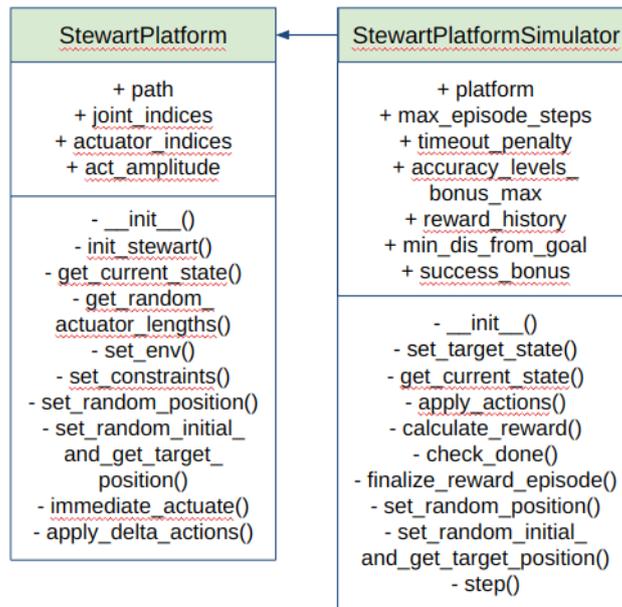


Рис. 5. UML-диаграмма классов среды

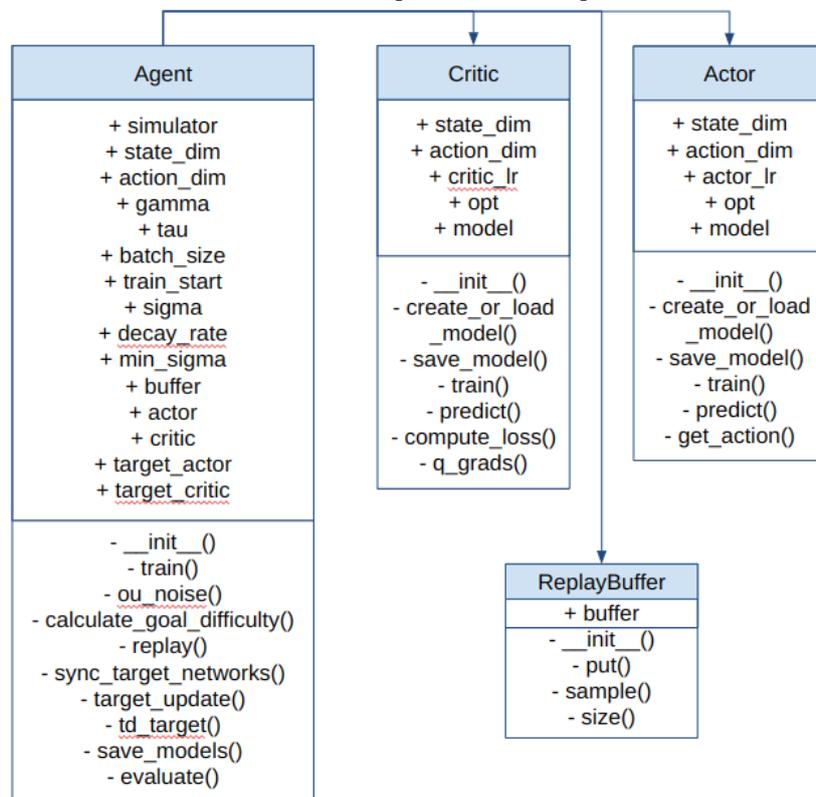


Рис. 6. UML-диаграмма классов агента

Рассмотрим подробнее архитектуру нейронных сетей, реализующих Актора и Критика в алгоритме DDPG, что позволит представить внутренние связи и процессы, происходящие во время обучения.

Актор (рис. 7) принимает на вход вектор состояния, который проходит через несколько слоев, обеспечивающих обработку информации: входной слой, первый полносвязный слой, второй полносвязный слой, выходной слой, Lambda слой. Входной слой принимает вектор состояния размерностью `state_dim`. Первый полносвязный

слой содержит 400 нейронов с активацией ReLU, этот слой преобразует входные данные и выделяет из них важные признаки. Второй полносвязный слой содержит 300 нейронов с активацией ReLU, продолжает обработку данных, выделяя более сложные признаки. Выходной слой содержит `action_dim` нейронов с активацией Tanh, выдавая действия. Lambda слой масштабирует выходные значения для получения допустимого диапазона действий, применяя функцию `scaled_delta`.



Рис. 7. Архитектура сети: Актор

Критик (рис. 8) оценивает качество действий, выдаваемых Актором, на основе текущего состояния, его архитектура имеет следующие слои: входные слои, первый полносвязный слой для состояния, второй полносвязный слой для состояния, полносвязный слой для действий, конкатенация слоев, полносвязный слой после конкатенации, выходной слой. Входные слои имеют два входа: вектор состояния размерностью state_dim и вектор действий размерностью

action_dim. Первый полносвязный слой для состояния содержит 400 нейронов, а второй полносвязный слой для состояния содержит 300 нейронов, оба имеют активацию ReLU. Полносвязный слой для действий содержит 32 нейрона и также имеет активацию ReLU. Конкатенация слоев объединяет обработанные состояния и действия. Полносвязный слой после конкатенации содержит 16 нейронов с активацией ReLU. Выходной слой содержит один нейрон с линейной активацией, представляющий оценку Q-value.

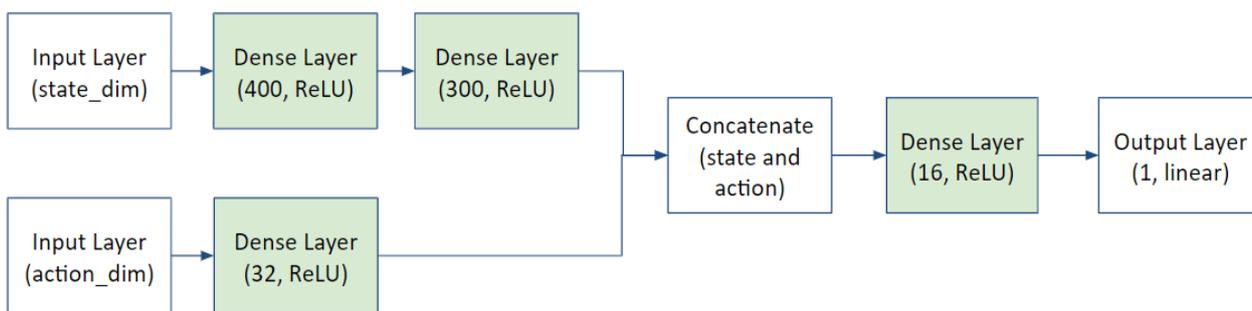


Рис. 8. Архитектура сети: Критик

Результаты. Рассмотрим результаты обучения нейронной сети, основанные на 500 эпизодах. На графике рис. 9 отображена средняя награда за каждый эпизод. Награда показывает общую эффективность действий агента, обучающегося достигать заданные координатные положения платформы. График демонстрирует рост

средней награды по мере увеличения количества эпизодов, что свидетельствует о прогрессе в обучении. Периоды колебаний награды указывают на адаптацию агента к новым условиям кинематического движения.

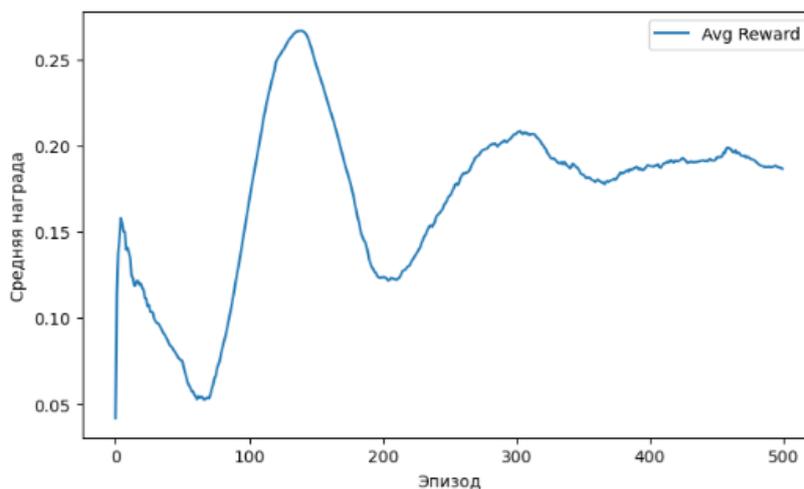


Рис. 9. Процесс обучения сети – средняя награда за эпизод

График рис. 10 показывает средний бонус за точность в пределах одного эпизода. Бонусы за точность выдаются, когда агент достигает требуемого положения платформы с высокой точностью. Рост среднего бонуса по мере обучения

указывает на то, что агент научился более точно достигать целевых позиций, улучшая свою производительность.



Рис. 10. Процесс обучения сети – средний бонус за точность за эпизод

График рис. 11 иллюстрирует количество шагов, необходимых для достижения целевого положения. Снижение количества шагов свидетельствует об улучшении эффективности агента. Агент учится обеспечивать требуемое целевое положение платформы быстрее, что является показателем успешного обучения и оптимизации

действий. Диаграмма рис. 12 показывает распределение успешных эпизодов по 25-эпизодным интервалам. Успешные эпизоды – это те, в которых агент достиг цели до истечения максимального количества шагов. Видно, что успешные эпизоды чаще встречаются ближе к концу обучения, что подтверждает улучшение модели.

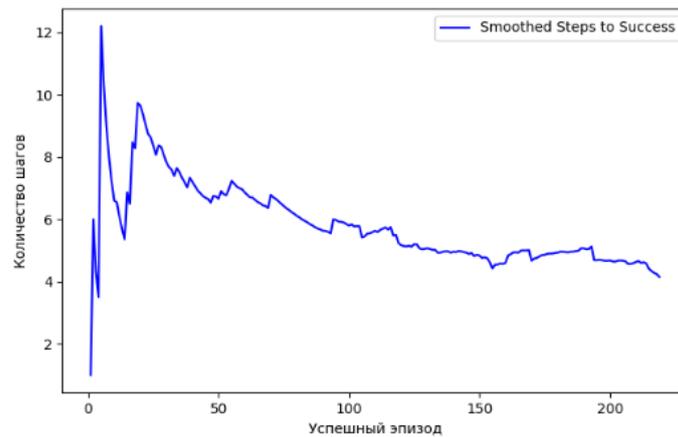


Рис. 11. Процесс обучения сети – количество шагов для достижения целевого положения по эпизодам

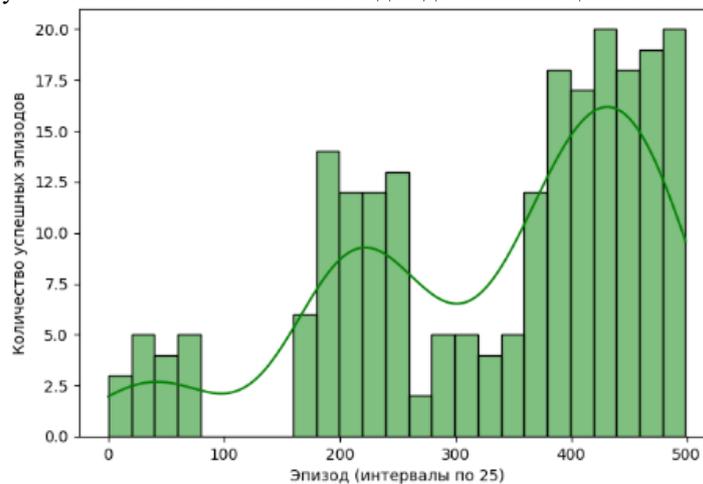


Рис. 12. Процесс обучения сети – распределение успешных эпизодов в интервалах по 25 эпизодов

В процессе обучения каждого эпизода записывался лог, включающий следующие ключевые данные: награды за каждый шаг и общая награда

за эпизод, бонусы за точность, если они были применены, штрафы за отклонения от целевых

значений, общее количество шагов, использованных для достижения цели, конечное и начальное положение платформы и её ориентация, выбор действий агентом на каждом шаге. Эти данные сохранялись для последующего анализа, что позволяло оценивать и корректировать параметры модели, а также следить за её прогрессом. Благодаря этому подробному логированию можно было отслеживать каждое изменение и его влияние на процесс обучения.

После завершения процесса обучения нейронной сети было выполнено тестирование обученной модели. Эксперимент тестирования

заключался в проверке способности нейронной сети достигать заданных целевых положений платформы Стюарта в координатном пространстве рабочей области симуляционной среды PyBullet. Было проведено 100 тестовых эпизодов, из которых 91 завершился успешно, что соответствует 91 % успеха. Ключевые метрики процесса представлены на рис. 13. Эти показатели демонстрируют высокую эффективность модели в выполнении поставленных задач. Модель достигала цели в среднем за 5.95 шагов, что свидетельствует о её высокой точности и скорости.

Успешные эпизоды	91/100	Средняя награда	8.77
Процент успеха	91.00%	Средний бонус за точность	5.74
Макс. количество шагов	20	Средний модуль действия	0.24
Среднее количество шагов	5.95	Средняя сложность цели	0.38

Рис. 13. Основные метрики процесса тестирования

На графиках рис. 14 показаны начальные положения и ориентации платформы. Зеленые звездочки обозначают целевые позиции, синие точки – успешные эпизоды, а красные крестики –

неудачные эпизоды. Видно, что модель успешно справляется с разнообразными начальными условиями, демонстрируя свою адаптивность и надежность.

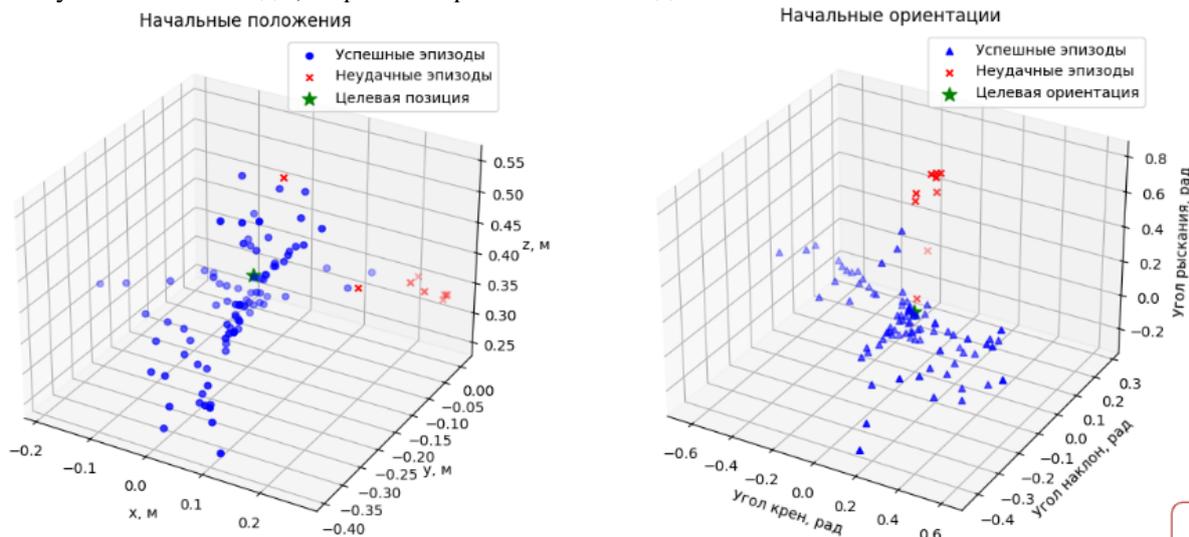


Рис. 14. Результаты тестирования нейронной сети

Для реализации процесса тестирования в программном коде использован метод evaluate, который выполняет следующие основные задачи:

1. Инициализация – определение начальных и целевых состояний платформы для каждого эпизода.
2. Запуск симуляции – запуск эпизода с заданным начальным состоянием и фиксированной целевой позицией и ориентацией.
3. Применение действий – Актор (нейронная сеть) предсказывает действия для текущего состояния, и эти действия применяются к платформе.

4. Обновление состояния – платформа переходит в новое состояние, и алгоритм оценивает награду за этот переход.

5. Запись результатов – результаты каждого шага и эпизода записываются для последующего анализа, включая награды, бонусы за точность, штрафы за отклонения и количество шагов.

6. Анализ успеха – проверка условий успешного завершения эпизода (достижение целевой позиции) или неудачи (превышение максимального количества шагов).

Метод логирует все ключевые метрики, что позволяет анализировать эффективность модели по каждому эпизоду. В результате были полу-

чены данные, подтверждающие высокую точность и скорость работы нейронной сети в различных условиях.

На рис. 15 представлен график зависимости количества шагов от сложности положения. Этот

график позволяет оценить, каким образом сложность начального состояния влияет на количество шагов, необходимых для достижения целевой позиции.

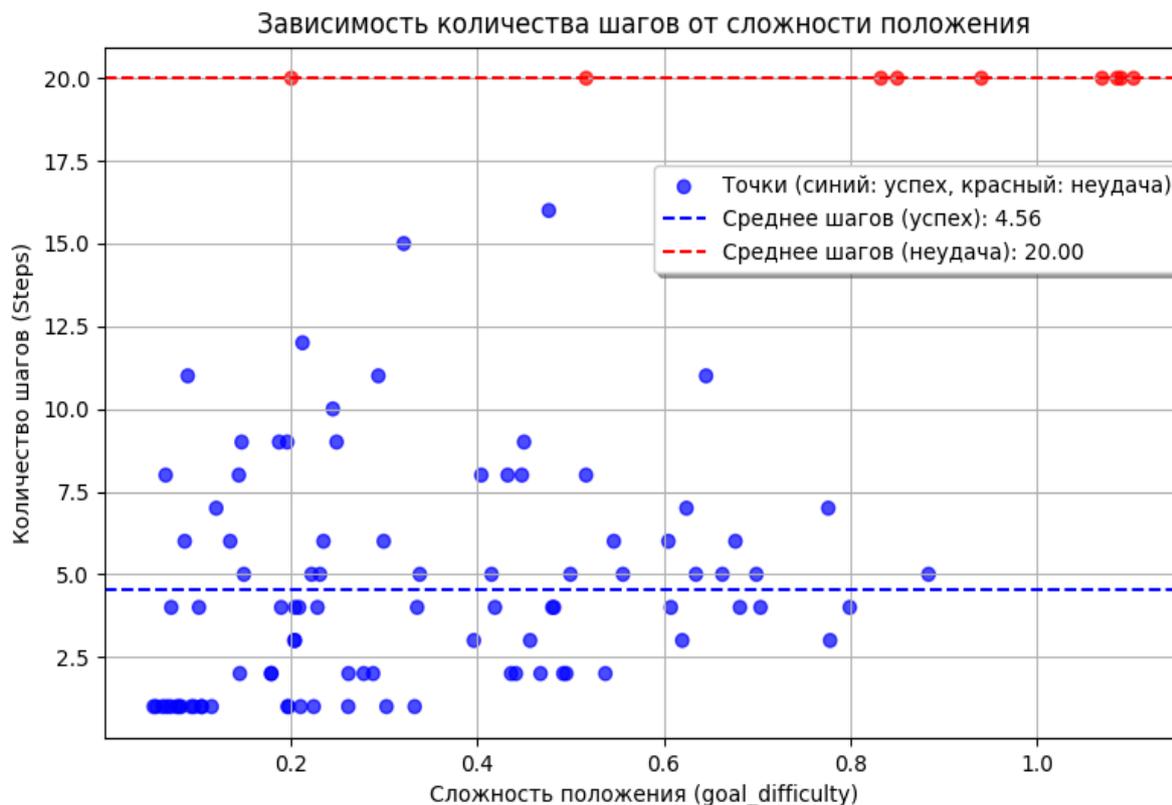


Рис. 15. Зависимость количества шагов от сложности положения

В эксперименте использованы 100 тестовых эпизодов. Успешность эпизода оценивалась по количеству необходимых шагов до достижения цели. Допустимым считалось количество шагов для достижения цели менее 20, в этом случае эпизод считался успешным. Если платформа не достигала цели за 20 шагов, то эпизод считался провальным. На графике синими точками обозначены успешные эпизоды, а красными – неудачные. Синие горизонтальные линии и красные горизонтальные линии представляют среднее количество шагов для успешных и неудачных эпизодов соответственно. Из графика видно, что среднее количество шагов для успешных эпизодов составляет 4.56 шага, что подтверждает высокую эффективность и точность модели.

Для оценки сложности начального положения платформы применялся метод `calculate_goal_difficulty`. При реализации метода используются два основных параметра: начальное состояние платформы и заданное целевое положение в координатной области. Оба этих параметра представляют собой одномерные массивы, содержащие позиции и ориентации платформы.

Под позицией здесь понимается координата рабочей области, а под ориентацией значение углов Эйлера. Сначала рассчитывается разница в позициях (векторное расстояние между начальными и целевыми координатами) и разница в ориентациях (векторное расстояние между начальными и целевыми углами ориентации). Затем эти две величины складываются для получения итогового значения сложности положения. Таким образом, сложность положения рассчитывается как сумма евклидовых расстояний между начальными и целевыми позициями и начальными и целевыми ориентациями платформы. Итоговое значение сложности положения характеризует, насколько далеко начальное координатное положение платформы находится от требуемого целевого положения в пространстве координатной области.

Как видно из графика, модель демонстрирует высокую стабильность и способность достигать цели даже при увеличении сложности начального состояния. Таким образом, результаты тестирования показывают, что разработанная нейронная сеть способна эффективно управлять платформой Стюарта, достигая требуемого

координатного положения за минимальное количество шагов, независимо от сложности начального состояния.

На рис. 16 показано для примера начальное и конечное положение платформы Стюарта в процессе выполнения тестирования. Начальное

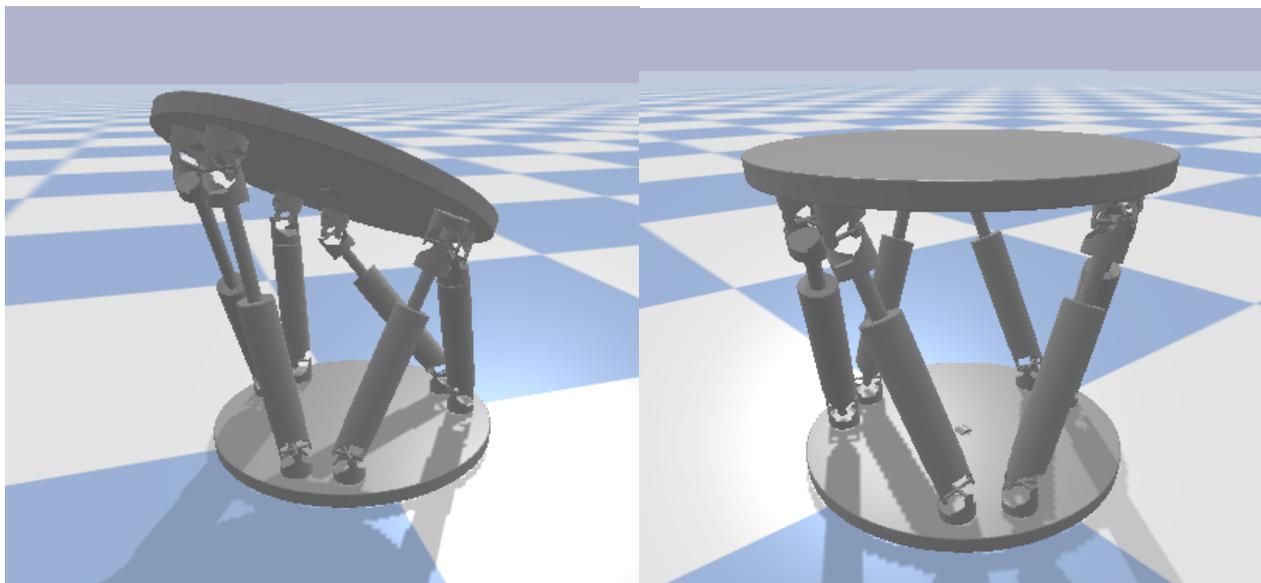


Рис. 16. Начальное и конечное положения платформы в процессе тестирования

Выводы. Предложенная интеллектуальная система управления платформой Стюарта расширяет ее функциональные возможности и обеспечивает высокую точность воспроизведения заданных траекторий движения. Интегрированный в систему управления алгоритм глубокого обучения с подкреплением (DRL) позволил системе адаптироваться к изменяющимся условиям и оптимизировать траекторию движения исполнительного элемента в реальном времени. Результаты тестирования модели показали, что предложенная система управления способна эффективно и точно управлять платформой Стюарта, достигая целевых позиций за минимальное количество шагов. Модель продемонстрировала высокую адаптивность и устойчивость к изменяющимся начальным условиям, что подтверждает перспективность использования методов машинного обучения в управлении механизмами параллельной кинематики.

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. Дуюн И.А., Корнилов А.В., Дуюн Т.А. Применение интерфейса Python-Adams для моделирования работы платформы Гью-Стюарта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С.

положение является отправной точкой для инициализации процесса управления с использованием нейронной сети. Платформа находится в произвольном случайном положении, которое используется для начальных условий в процессе тестирования.

96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-96-106

2. Дуюн И.А., Дуюн Т.А., Кабелянц П.С. Моделирование особых положений роботизированной платформы и определение параметров ее управляемости // СТИН. 2023. № 5. С. 2–6.

3. Дуюн И.А., Кабелянц П.С., Зуев С.В., Дуюн Т.А., Малышев Д.И. Определение индекса управляемости и выявление особых положений параллельного манипулятора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 5. С. 116–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-116-125

4. Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А. Совместное моделирование движения параллельного манипулятора с использованием Adams-Matlab // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119.

5. Duyun T.A., Duyun I.A., Rybak L.A., Perevuznik V.V. Simulation of the Structural and Force Parameters of a Robotic Platform Using Co-Simulation // Procedia Computer Science. 2022. Vol. 213. Pp. 720–727. DOI: 10.1016/j.procs.2022.11.126

6. Duyun I.A., Duyun T.A., Kabalyants P.S., Rybak L.A. Optimization of a 6-DOF Platform for Simulators Based on an Analysis of Structural and Force Parameters // Machines. 2023. Vol. 11. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/machines11080814

7. Леонов Г.А., Зегжда С.А., Зуев С.М. Динамика платформы Стюарта и управление ее движением // Доклады академии наук. 2014. Т. 458. № 1. С. 36–41. DOI: 10.7868/S0869565214250094

8. Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K. A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance // *Applied Sciences*. 2021. 11(19). 8911. DOI: 10.3390/app11198911
9. Vieira H.L., de Carvalho Fontes J.V., Beck A.T., da Silva M.M. Robust Critical Inverse Condition Number for a 3RRR Robot Using Failure Maps // Springer International Publishing. 2018. Pp. 285–294. DOI: 10.1007/978-3-319-67567-1_27
10. Dasmahapatra S., Ghosh M. Workspace Identification of Stewart Platform // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2020. Vol. 9. Pp. 1903–1907. DOI: 10.35940/ijeat.C5338.029320
11. Peng Y., Dai H., Zhang H., Yue X. Dynamics and control of a bio-inspired Stewart platform // *Xibeigongye Daxue Xuebao / Journal of Northwestern Polytechnic University*. 2021. Vol. 39. Pp. 258–266. DOI: 10.1051/jnwpu/20213920258
12. Karakas B., Senay B. Kinematics of Supination and Pronation with Stewart Platform // *J. Math. Sci. Model*. 2021. Vol. 4. Pp. 1–6. DOI: 10.33187/jmsm.815125
13. Merlet J.P. Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots // *Journal of Mechanical Design*. 2006. Vol. 128. Pp. 199–206. DOI: 10.1115/1.2121740
14. Dash K.K., Choudhury B.B., Senapati S.K. Inverse Kinematics Solution of a 6-DOF Industrial Robot // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 758. Pp. 183–192. DOI: 10.1007/978-981-13-0514-6_19
15. Vieira H.L., da Silva M.M., Beck A.T. Reliable Motion Planning for Parallel Manipulators // *Mechanism and Machine Theory*. 2019. Vol. 140. Pp. 553–566. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.06.022
16. Zhukov Y.A., Korotkov E.B., Moroz A.V., Zhukova V.V., Abramov A.M. Adaptive Neural Network Control of Hexapod for Aerospace Application // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 441. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012001
17. Valentino K., Kevin K., Singgih J., End D. Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator // *Internetworking Indones. J*. 2022. Vol. 11. Pp. 23–28.
18. Li S., Jin L., Mirza M. Neural Network Based Stewart Platform Control // *Wiley-IEEE Press*. 2019. Vol. 7. Pp. 105–129. DOI: 10.1002/9781119557005.ch7

Информация об авторах

Дуюн Иван Александрович, студент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кабальянц Петр Степанович, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.09.2024 г.

© Дуюн И.А., Кабальянц П.С., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А., 2024

***Duyun I.A., Kabalyants P.S., Duyun T.A., Rybak L.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
**E-mail: duyun77@mail.ru*

REINFORCEMENT LEARNING-BASED INTELLIGENT CONTROL FOR STEWART PLATFORM

Abstract. This article presents an intelligent control system for the Stewart platform, a parallel kinematic mechanism with six degrees of freedom. One of the main challenges of such mechanisms is the presence of singular positions within the workspace, which can lead to instability. Standard control algorithms often prove ineffective when navigating these potentially unstable zones. Therefore, the proposed control system utilizes Reinforcement Learning, a type of machine learning, as its core component. The choice of this method is

motivated by its effectiveness in continuous action spaces, which is crucial for ensuring smooth movement within a workspace with variable coordinates. In conditions involving operational loads, vibrations, and temperature fluctuations, real-time correction is necessary. The application of an artificial neural network enhances accuracy and flexibility, enabling the system to adapt to changing operational conditions without compromising performance by modeling complex nonlinear dependencies and learning from accumulated experience. The paper discusses the following aspects of the control system: the working scheme and overall architecture of the reinforcement learning method, the learning algorithm scheme, UML diagrams of the environment and agent classes, the architecture of the actor-critic network, the network training process, and the results of its testing, which demonstrate high efficiency in its application.

Keywords: Stewart platform, reinforcement learning, neural networks, parallel kinematics, intelligent control system, simulation in PyBullet

REFERENCES

1. Duyun I.A., Kornilov A.V., Duyun T.A. Application of Python-Adams Interface for Modeling the Operation of the Gough-Stewart Platform [Primenenie interfeysa Python-Adams dlya modelirovaniya raboty platformy Gyuy-Syuarta]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 96–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-96-106. (rus)
2. Duyun I.A., Duyun T.A., Kabalyants P.S. Modeling of Singular Positions of a Robotic Platform and Determination of its Controllability Parameters [Modelirovanie osobykh polozheniy robotizirovannoy platformy i opredelenie parametrov eye upravlyaemosti]. STIN. 2023. No. 5. Pp. 2–6. (rus)
3. Duyun I.A., Kabalyants P.S., Zuev S.V., Duyun T.A., Malyshev D.I. Determination of the Controllability Index and Identification of Singular Positions of a Parallel Manipulator [Opredelenie indeksa upravlyaemosti i vyiyavlenie osobykh polozheniy parallel'nogo manipulyatora]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 5. Pp. 116–125. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-116-125. (rus)
4. Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A. Co-Simulation of Parallel Manipulator Motion Using Adams-Matlab [Sovmestnoe modelirovanie dvizheniya parallel'nogo manipulyatora s ispol'zovaniem Adams-Matlab]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119. (rus)
5. Duyun T.A., Duyun I.A., Rybak L.A., Perezvuznik V.V. Simulation of the Structural and Force Parameters of a Robotic Platform Using Co-Simulation. Procedia Computer Science. 2022. Vol. 213. Pp. 720–727. DOI: 10.1016/j.procs.2022.11.126.
6. Duyun I.A., Duyun T.A., Kabalyants P.S., Rybak L.A. Optimization of a 6-DOF Platform for Simulators Based on an Analysis of Structural and Force Parameters. Machines. 2023. Vol. 11. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/machines11080814.
7. Leonov G.A., Zegzhda S.A., Zuev S.M. Dynamics of the Stewart Platform and Control of its Motion [Dinamika platformy Styuarata i upravlenie
8. Ribeiro P.R., Andre M., Philipp K., Karel K. A VR Truck Docking Simulator Platform for Developing Personalized Driver Assistance. Applied Sciences. 2021. 11(19). 8911. DOI: 10.3390/app11198911.
9. Vieira H.L., de Carvalho Fontes J.V., Beck A.T., da Silva M.M. Robust Critical Inverse Condition Number for a 3RRR Robot Using Failure Maps. Springer International Publishing. 2018. Pp. 285–294. DOI: 10.1007/978-3-319-67567-1_27.
10. Dasmahapatra S., Ghosh M. Workspace Identification of Stewart Platform. International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2020. Vol. 9. Pp. 1903–1907. DOI: 10.35940/ijeat.C5338.029320.
11. Peng Y., Dai H., Zhang H., Yue X. Dynamics and Control of a Bio-Inspired Stewart Platform. Xibei gongye Daxue Xuebao / Journal of Northwestern Polytechnic University. 2021. Vol. 39. Pp. 258–266. DOI: 10.1051/jnwpu/20213920258.
12. Karakas B., Senay B. Kinematics of Supination and Pronation with Stewart Platform. J. Math. Sci. Model. 2021. Vol. 4. Pp. 1–6. DOI: 10.33187/jmsm.815125.
13. Merlet J.P. Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots. Journal of Mechanical Design. 2006. Vol. 128. Pp. 199–206. DOI: 10.1115/1.2121740.
14. Dash K.K., Choudhury B.B., Senapati S.K. Inverse Kinematics Solution of a 6-DOF Industrial Robot.
15. Vieira H.L., da Silva M.M., Beck A.T. Reliable Motion Planning for Parallel Manipulators. Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 140. Pp. 553–566. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.06.022.
16. Zhukov Y.A., Korotkov E.B., Moroz A.V., Zhukova V.V., Abramov A.M. Adaptive Neural Network Control of Hexapod for Aerospace Application. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 441. P. 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012001.

17. Valentino K., Kevin K., Singgih J., End D. Dynamic Models Based Virtual Reality Flight Simulator. *Internetworking Indones. J.* 2022. Vol. 11. Pp. 23–28.

18. Li S., Jin L., Mirza M. *Neural Network Based Stewart Platform Control*. Wiley-IEEE Press. 2019. Vol. 7. Pp. 105–129. DOI: 10.1002/9781119557005.ch7.

Information about the authors

Duyun, Ivan A. Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kabalyants, Petr S. Candidate of Engineering Sciences. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Duyun, Tatyana A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rybak, Larisa A. Doctor of Engineering Sciences. E-mail: rl_bgtu@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 05.09.2024

Для цитирования:

Дуюн И.А., Кабелянц П.С., Дуюн Т.А., Рыбак Л.А. Интеллектуальная система управления платформой Стюарта на основе применения метода обучения с подкреплением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 102–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-102-115

For citation:

Duyun I.A., Kabalyants P.S., Duyun T.A., Rybak L.A. Reinforcement learning-based intelligent control for Stewart platform. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 11. Pp. 102–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-102-115

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131

Поляков А.Н., *Никитина И.П., Позевалкин В.В.

Оренбургский государственный университет

*E-mail: innanikitina@list.ru

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА

Аннотация. Представлена методика построения цифровой модели термодиформационной системы станка, используемой при создании цифровых двойников станков, для которых актуально их термоупругое поведение, основанное на решении задачи термоупругости. В качестве специального программного обеспечения, позволяющего создать цифровую модель, использованы платформы Ansys Workbench и Ansys Twin Builder. В качестве объекта моделирования использован двусторонний торцевально-шлифовальный станок, для которого ранее были проведены экспериментальные исследования. Экспериментальные данные позволили сформировать целевые значения оптимизационной задачи. Разработана общая методика построения цифровой модели основанной на использовании FMI-стандарта для обмена динамическими библиотеками. В работе показано практическое применение цифровой модели станка к решению задачи идентификации термодиформационной модели станка. Задача идентификации решалась в экстремальной постановке. Представлен анализ эффективности применения шести методов оптимизации: квазиньютоновский метод; поиск по шаблону; многоцелевой генетический алгоритм; метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; метод адаптивной многоцелевой оптимизации; метод адаптивной одноцелевой оптимизации. Предпочтительными по эффективности оказались методы частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования и адаптивной одноцелевой оптимизации. Их применение позволяет получить уточненные параметры модели с погрешностью достижения целевых значений моделирования менее 2 %.

Ключевые слова: цифровые двойники, цифровые модели, термодиформационная модель станка, методы оптимизации

Введение. В последнее время цифровые технологии и цифровые двойники (ЦД) приобретают особую значимость как при создании новой техники и новых производств, так и при поиске путей совершенствования существующего производства и выпускаемого высокотехнологичного оборудования [1–4]. Самыми значимыми примерами применения в России цифровых технологий является создание в Публичном акционерном обществе «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК») гражданского лайнера SSJ-100 и боевых самолетов Су-35 и Су-57 [1, 3], а также новые технологии проектирования авиационных двигателей АИ222-25, ТВ7-117СТ, ПД14 и ПД-8 [2, 4]. Проектировщики отмечают, что использование цифровых моделей позволило сократить разработку новейшей авиационной техники не только на месяцы, но и на годы. Так при создании двигателя ПД-14 использование ЦД позволило существенно сократить сроки его изготовления и получить серийный образец уже через 3,5 года [4]. Применение технологии ЦД привели к успешному завершению испытаний двигателя ПД-8. При этом в корпорации считают, что сокращение затрат на всех этапах разработки двигателя может составлять до 30 % [2].

Несмотря на то, что в настоящее время в России уже принят ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», все равно в научной литературе присутствуют или общие рассуждения на тему ЦД [4–9], или подмена понятий: цифровые двойники и модели; компьютерные и имитационные модели; математическое моделирование; жизненный цикл изделия [10–13]. При этом из-за того, что термин цифровых двойников набирает популярность на производстве, то и стоимость цифрового двойника как конечного продукта пропорционально растет его популярности. Однако реальных научных работ, которые бы дали методику создания цифрового двойника в отечественной литературе очень немного. Один из подходов к созданию цифровых двойников изложен в работах, выполненных под руководством профессора Кабалдина Ю.Г. [14–20]. В качестве базового математического аппарата используются искусственные нейронные сети. Их использование позволило показать методику создания цифровых двойников для различных объектов и процессов: процесса стружкообразования [14, 16], процесса 3D-печати электродуговой наплавкой [17, 18], режущего инструмента [14, 19], металлорежущего станка с ЧПУ [14, 20].

Более разнообразные подходы к созданию цифровых двойников представлены в зарубежной литературе [21–24].

Так в работе [21] наряду с нейросетевыми технологиями представлены конечно-элементные модели с использованием программного комплекса LS-Dyna, а также особый акцент сделан на вычислительных моделях процесса резания. В работе [22] предложена комплексная система оценки производительности электрошпинделя станка с ЧПУ, реализуемая с помощью цифрового двойника. Цифровой двойник реализован с использованием технологии мультидоменного физического моделирования. Анализ полученных результатов показал, что расхождения модельных и экспериментальных данных для температур и характеристик жесткости электрошпинделя не превысили 6 %. При этом представленная в работе модель шпинделя является одновременно многопараметрической, мультидоменной и многофункциональной. Однако из-за сложной шпиндельной системы станков с ЧПУ, включающей множество физических процессов, предложенная в работе модель не является полной, а в определенной степени упрощенной. Поэтому авторы сформулировали задачу усовершенствования модели за счет: уточнения функциональных характеристик шпинделя на основе более точных характеристик отдельных функциональных компонентов цифровой модели; учета влияния силы резания, внешней вибрации и других физических факторов, сопутствующих работе шпинделя.

В работе [23] предлагается набор цифровых систем моделирования и мониторинга станка, направленных на решение проблемы низкой скорости моделирования станка при оценке столкновения инструментов с узлами работающего станка. Сначала реконструируется физическая модель, а затем строится модель тел столкновения для инструментов и узлов станка. По сравнению с традиционным алгоритмом обнаружения столкновений, предлагаемый алгоритм обнаружения столкновений более точен для инструмента и обладает более высокой точностью обнаружения столкновений и резания заготовки. Используя этот метод, моделирование резания и обнаружение столкновений в G-коде может быть выполнено за 0,02 секунды, что не только повышает скорость моделирования, но и повышает точность обнаружения столкновений.

В работе [24] рассматривается архитектура ЦД станка с ЧПУ на основе мультидоменного физического моделирования. Изложен метод оценки применимости технологии цифрового двойника для станков с ЧПУ. Этот метод сначала анализирует предъявляемые к станку с ЧПУ тре-

бования с позиций использования в нем технологии ЦД. А затем исследуется оценка применимости технологии ЦД для станка с ЧПУ на основе оптимальной модели оценки, а также алгоритмов системного проектирования. Эта оценка определяется количественно.

В работе [25] также представлено построение цифрового двойника с использованием мультидоменного физического моделирования. В работе показано использование стратегии прогнозирования и диагностики неисправностей для фрезерного станка с ЧПУ; подробно описана цифровая модель привода подачи по оси X.

В работе [26] представлен метод разработки цифрового двойника интеллектуального станка с ЧПУ (ИМТ). Для сбора и обработки данных в режиме реального времени применена технология мультисенсорного слияния. Разработано несколько форм и приложений для визуализации и анализа данных в цифровом двойнике, включая траекторию обработки, состояние обработки и потребление энергии. Модель цифрового двойника ИМТ создается с целью дальнейшего анализа и оптимизации данных, таких как динамика станка, оценка ошибок контура и компенсация. Представлены примеры применения цифрового двойника ИМТ.

С позиций концептуального представления о цифровом моделировании и формирующихся терминах в этой области исследований следует отметить работы зарубежных и отечественных авторов [5, 8, 9]. Однако, учитывая, что ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» уже введен в действие с 16.09.2021 будем руководствоваться там принятыми терминами для «цифрового двойника изделия» и «цифровой модели изделия».

Методы, оборудование. Одной из проблем разработки цифровых двойников изделия является реализация компьютерных моделей, входящих в цифровую модель изделия, в режиме реального времени. При этом компьютерные модели реализуются в различных программных системах. Кроме этого, собственно, цифровой двойник изделия реализуется на некоторой программно-технологической платформе, оснащенной двусторонними информационными связями с изделием и его компонентами.

В последние годы стали появляться новые стандарты структурирования информации и хранения данных, которые из-за компактности компьютерного кода и высокого быстродействия его обработки позволяют эффективно решать задачи мультифизического моделирования в режиме реального времени. Например, FMI-стандарт [27] или Functional Mock-UP Interface (интерфейс

функционального макета) – бесплатный стандарт, который определяет обмен динамическими моделями с использованием комбинации XML-файлов, двоичных файлов и С-кода, распространяемых в виде архивного FMU-файла (Functional Mock-up Unit можно перевести как модуль функционального макета). FMI-стандарт поддерживается более чем 170 программными системами.

Экспериментальные натурные исследования проводились на двустороннем торцешлифовальном станке. Машинные эксперименты проводились на разных рабочих станциях на базе процессоров Intel Core i9 и i5, а также процессорах AMD Ryzen Threadripper 24-Core.

Ниже приведена методика разработки цифровой модели двустороннего торцешлифовального станка, построенной с использованием FMI-стандарта.

Основная часть. Структура модели термомодеформационной системы станка, генерирующая FMU-файл приведена на рис. 1.

Тепловая и термоупругая модели станка определяются условиями однозначности: геометрическими (Г), физическими (Ф) граничными (Гр) и начальными условиями (Н).

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [C^{tu}] & [C^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\{u\}} \\ \dot{\{T\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{tu}] \\ [0] & [K^t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где $[C^{tu}]$ – матрица термоупругого затухания, размер $n \times m$; $[C^t]$ – матрица температурного затухания, размер $n \times n$; $\dot{\{u\}}$ – вектор скоростей изменения перемещений, длина m ; $\dot{\{T\}}$ – вектор скоростей изменения температур, длина n ; $[K^{tu}]$ – термоупругая составляющая матрицы жесткости, размер $m \times n$; $[K^t]$ – матрица теплопроводности, размер $n \times n$.

Система (1) представляет тепловую модель термомодеформационной системы станка, базируясь на законе сохранения энергии, в качестве решения имеет температурное поле. В качестве входных параметров рассматривается множество тепловых потоков, приложенных к различным внутренним и наружным поверхностям несущей системы станка или отводящих тепло в виде конвективного теплообмена. Множество входных параметров описывается следующим образом:

$$\Omega_{in}^1 = \{q_1, \dots, q_i, \dots, q_f; \alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_s\}, \quad (4)$$

В зависимости от вида решаемой задачи термоупругости – связанной и несвязанной, по-разному представляется термоупругая модель.

Для несвязанной задачи термоупругости термоупругая модель, базируясь на решении задачи статики о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле, описывается системой уравнений вида:

$$[C]\{\dot{T}\} + [H]\{T\} = \{Q\}, \quad (1)$$

$$[K]\{\delta\} = \{F\}, \quad (2)$$

где $[C]$ – матрица теплоёмкости, размер $n \times n$; $[H]$ – матрица теплопроводности, размер $n \times n$; $[K]$ – матрица жёсткости, размер $m \times m$; $\{\delta\}$ – вектор перемещений, длина m ; $\{Q\}$, $\{F\}$ – векторы узловых тепловой и механической нагрузок, каждый длиной n и m , соответственно; n – число узлов расчетной схемы.

Для связанной задачи термоупругости уравнения (1) и (2) решаются совместно:

где q_i – тепловой поток, Вт, или плотность теплового потока, Вт/м², i -ой поверхности; α_j – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К), для j -ой поверхности; f, s – число поверхностей подвода и отвода тепла.

Ниже в машинных экспериментах в качестве искомым параметров q_i рассматривались тепловые потоки. В качестве множества выходных параметров рассматривается совокупность показаний виртуальных датчиков температуры:

$$\Omega_{out}^1 = \{T_1, \dots, T_i, \dots, T_p\}, \quad (5)$$

где p – число поверхностей температурных датчиков.

При решении несвязанной задачи термоупругости система (2) фактически описывает задачу статики, но на холостом ходу работы станка используется только тепловая нагрузка, обусловленная сформировавшимся в несущей системе станка температурным полем. Поэтому для системы (2) множество входных параметров совпадает с множеством выходных параметров (5) си-

стемы (1). В качестве выходных параметров рассматриваются только абсолютные и относительные температурные перемещения отдельных элементов несущей системы станка:

$$\Omega_{out}^2 = \{\delta T_1, \dots, \Delta T_j, \dots, \delta T_b, \Delta T_c\}, \quad (6)$$

где $\delta T_i, \Delta T_i$ – абсолютные и относительные температурные перемещения; b – число датчиков измерения абсолютных температурных перемещений; c – количество данных относительных температурных перемещений.

Относительные перемещения являются зависимыми переменными, так как они получаются расчетным путем из геометрических построений.

Решение задачи термоупругости в виде систем (1)–(3) для любого уровня сложности конструкций в настоящее время просто решается во многих коммерческих САЕ-системах (Ansys, Creo, Siemens NX, Comsol Multiphysics, Inventor и других). Однако выбор Workbench Ansys обусловлен тем, что данная система имеет инструментальные средства, позволяющие легко создать FMU-файл, который затем может передан в Ansys Twin Builder для последующей обработки.

Если последовательность решения задачи термоупругости понятна и выше ясно описана, то формирование FMU-файла требует отдельного пояснения. Для формирования FMU-файла используется технология Ansys Design Explorer, которая позволяет построить поверхность отклика, на основании которой формируется FMU-файл:

1. формируется геометрическая модель исследуемого объекта в векторном формате, например, с использованием любой CAD-системы;

2. затем создаётся проект в Ansys Workbench, в котором импортируется геометрическая модель и задаются физические условия;

3. этот этап, в зависимости от выбранного типа решения задачи термоупругости, реализуется двумя способами:

- 3.1 если выбирается решение несвязанной задачи термоупругости, то сначала строится тепловая модель с учётом граничных и начальных условий и выполняется расчёт; тепловые потоки и конвективный теплообмен (в виде коэффициентов теплоотдачи) для отдельных поверхностей геометрической модели задаются некоторыми фиксированными значениями, в виде параметров модели (в Workbench предусматривается символ «р»); в разделе «Solution» дерева проекта задается размещение температурных датчиков, их значения тоже заносятся в параметры модели; с учётом данных температур, которые выступают в качестве тепловой нагрузки, строится упруго-

деформационная модель и выполняется её расчёт; также в разделе «Solution» дерева проекта задается размещение датчиков перемещений, их значения тоже заносятся в параметры модели;

- 3.2 если решается связанная задача термоупругости, то создаваемый проект на базе системы анализа Coupled Field предусматривает одновременное задание граничных условий для единой термоупругой модели в виде тепловых потоков и конвективного теплообмена, а также параметров механического закрепления геометрической модели; в этом случае температурное поле и поле деформаций являются результатами расчёта единой термоупругой модели, поэтому показания температурных датчиков и датчиков перемещений одновременно задаются в качестве параметров модели в разделе «Solution» дерева проекта;

4. после того как сформировано множество параметров модели из раздела Design Exploration, выбирается инструмент для построения поверхности отклика Response Surface; по умолчанию, при построении поверхности отклика, для каждого проектного параметра (Design Variable – в терминах Ansys Workbench) задаётся область изменения в пределах +/- 10 % от заданного начального значения параметра; после построения поверхности отклика формируется FMU-файл.

В соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 построенная термоупругая модель должна пройти верификацию и валидацию. Верификация модели заключается в подтверждении корректности её решения. Учитывая, что используется лицензионный коммерческий продукт, то на корректность решения задачи термоупругости решающую роль оказывают геометрические и физические условия. Поэтому, выполнив анализ полученных различных решений, с характерным изменением входных параметров, можно оценить корректность модели. А вот для того, чтобы выполнить валидацию модели, необходимо использовать экспериментальные данные.

На рис. 1 представлена последовательность формирования FMU-файла при решении несвязанной задачи термоупругости.

При решении связанной задачи термоупругости последовательность формирования FMU-файла принципиально не меняется. Отличие будет строиться на исключении всех блоков модели, связанных с тепловой моделью.

Одним из этапов процедуры валидации модели является процедура идентификации модели [28]. Решение задачи идентификации в экстремальной постановке является одним из наиболее просто реализуемых способов применения компьютерных моделей в Ansys Twin Builder. Струк-

тура такой компьютерной модели термодеоформационной системы станка с использованием FMU-файла приведена на рис. 2.

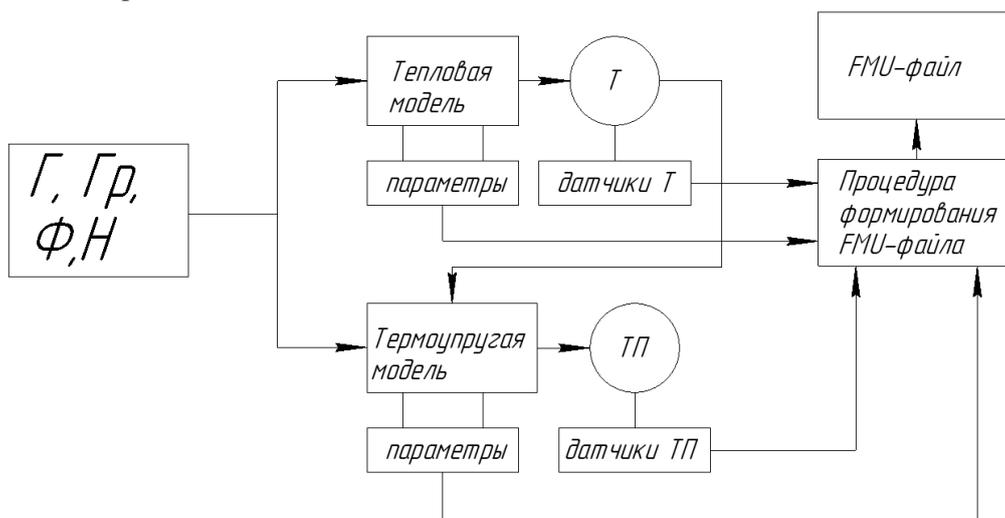


Рис. 1. Последовательность формирования FMU-файла:
Т – температура; ТП – температурные перемещения

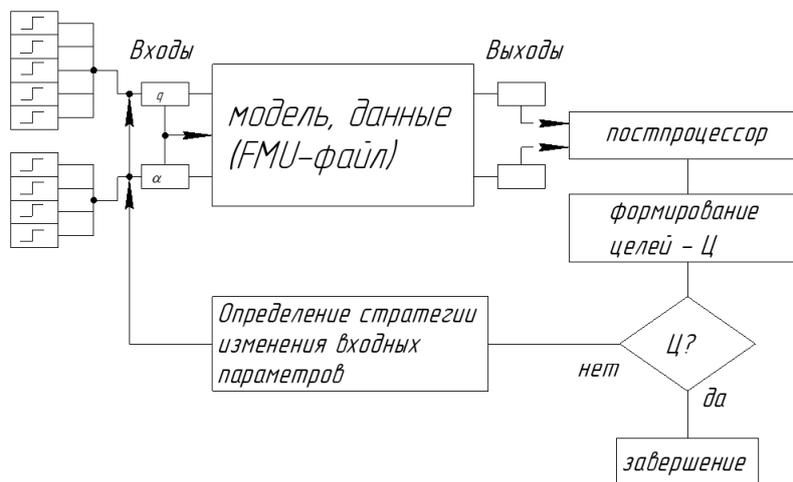


Рис. 2. Структура компьютерной модели термодеоформационной системы станка с использованием FMU-файла

Пример построения цифровой модели двустороннего торцевшлифовального станка в Ansys.

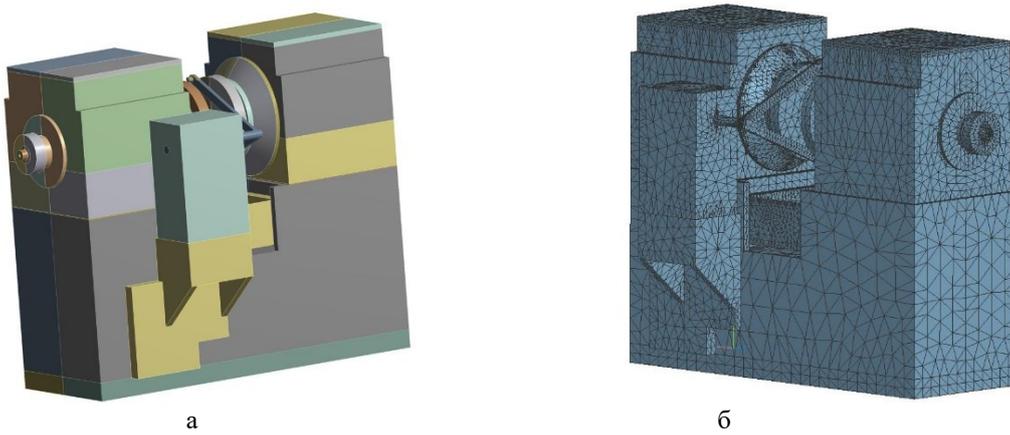
1 этап – формирование fmu-модели. Для этого: формируется геометрическая модель несущей системы станка в Компас 3D и экспортируется в Ansys Workbench, где формируется сеточная модель (рис. 3), задаются физические и начальные условия; в зависимости от особенностей моделируемого теплового процесса (холостой или рабочий ход станка) задаются граничные условия; формируется множество входных и выходных параметров; выполняется базовый расчёт; формируется поверхность отклика с использованием инструментов раздела Design Exploration в Ansys Workbench; схемы проектов формирования fmu-моделей для двух постановок задачи термоупругости (несвязанная и связанная) представлены на рис. 4.

2 этап – создание проекта в Ansys Twin Builder. Для этого сначала загружается fmu-модель, что приведет к появлению изображения поверхности с открытыми входами и выходами; затем в проект добавляются ступенчатые функции Step для каждого входа, вида:

$$H(x) = \begin{cases} h, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где h – это значения входных параметров.

Особенностью является то, что только до запуска процедуры оптимизации значения входных параметров принимают некоторые начальные значения, например, из базовой термоупругой модели, сформированной в Ansys Workbench. Затем эти значения становятся оптимизируемыми параметрами и для них назначают параметрические ограничения.



а б
Рис. 3. Геометрическая и сеточная модели несущей системы станка

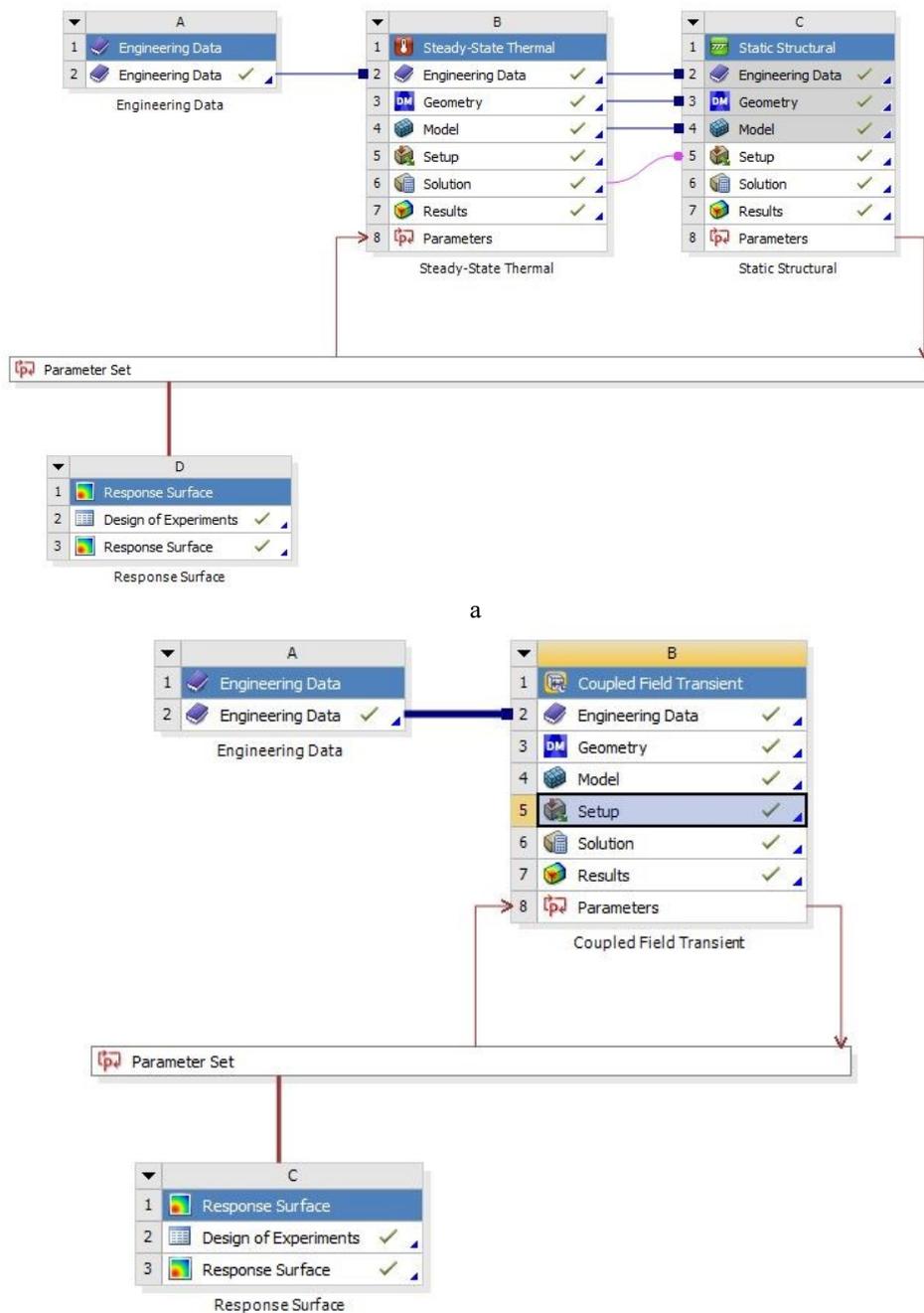


Рис. 4. Схемы проектов формирования fmu-моделей в Workbench для двух постановок задачи термоупругости: а – несвязанная; б – связанная

Особенностью использования этой модели является то, что её можно использовать как альтернативу для модели, реализованной в Workbench. При этом время моделирования существенно меньше. Этот способ использования модели позволяет получить экспресс-оценки влияния каждого входного параметра. Что позволяет более точно назначить параметрические ограничения.

3 этап – постановка задачи оптимизации.

На этом этапе вводятся дополнительные зависимые переменные, которые впоследствии используются в качестве целей или критериев оптимизации (идентификации) или в качестве критериальных ограничений. Данные зависимые переменные для каждой задачи задаются индивидуально. Формально они впоследствии участвуют в качестве целей для температур или для температурных перемещений. На рис. 5 эти зависимые переменные сведены в блок EQU. Здесь множество входных параметров: P121, ..., P129, а множество выходных параметров: P110, ..., P120 и P130, P131.

При проведении идентификации термоупругой модели станка необходимо выбрать параметры, которые могут быть непосредственно или измерены в ходе эксперимента или получены в результате аналитических вычислений по имеющимся экспериментальным данным.

Экспериментальные исследования данной компоновки станка показали, что критическим для точности обработки является взаимное положение диска подачи и абразивного инструмента, возникающее из-за роста тепловых деформаций несущей системы станка. При этом наибольшее влияние на точность обработки оказывают перемещения в плоскости, проходящей через оси обоих шпиндельных узлов перпендикулярно станине [29]. Для оценки тепловых деформаций станка использовалась ранее апробированная в натурных испытаниях конструктивная схема установки датчиков, которая нашла отражение в геометрической модели станка в виде двух рычагов (рис. 3).

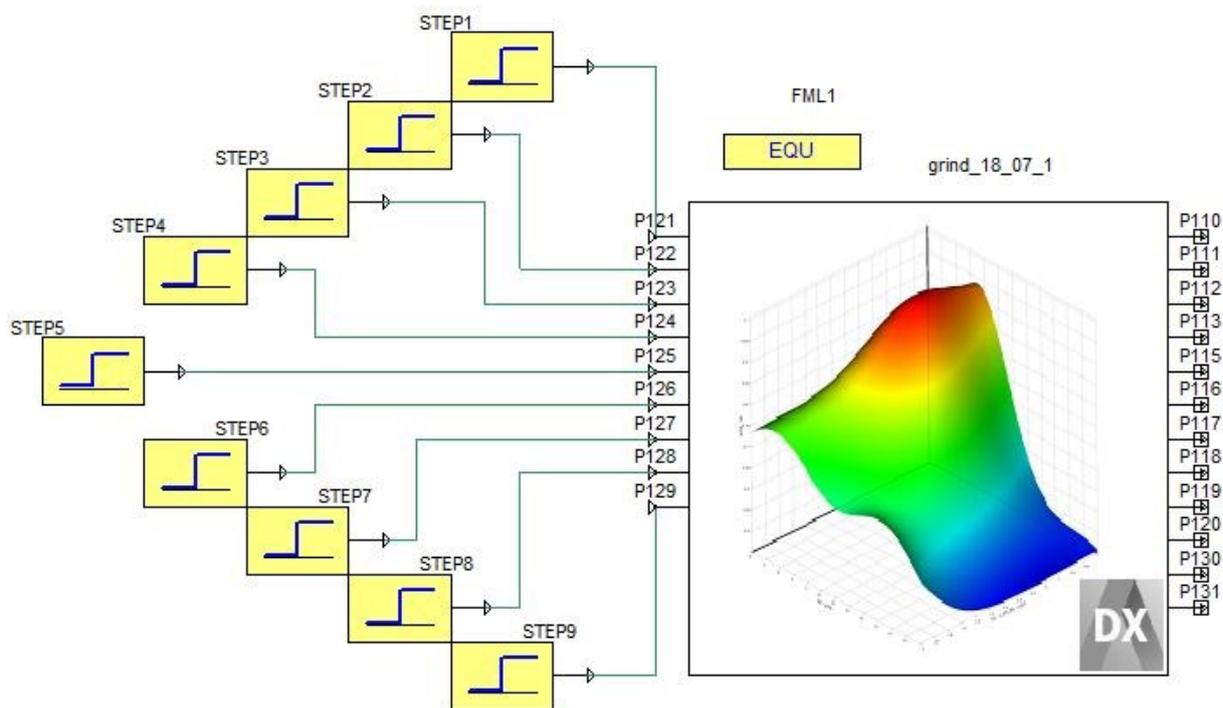


Рис. 5. Фрагмент проекта в Ansys Twin Builder

Это даёт возможность составить соотношения, которые в дальнейшем будут использоваться при задании целевой функции и других критериальных ограничениях:

$$\Delta_L = \delta'_{L,u} - \delta'_{L,d}; \quad \Delta_r = \delta'_{r,u} - \delta'_{r,d}, \quad (8)$$

$$\delta'_{L,u} = \delta_{L,u} - \delta_{rch,u}; \quad \delta'_{L,d} = \delta_{L,d} - \delta_{rch,d}, \quad (9)$$

$$\delta'_{r,u} = \delta_{r,u} - \delta_{rch,u}; \quad \delta'_{r,d} = \delta_{r,d} - \delta_{rch,d}, \quad (10)$$

где Δ_L – смещения фланца левого шпинделя; Δ_r – смещения фланца правого шпинделя; $\delta'_{L,u}$ – смещения верхней точки фланца левого шпинделя относительно центральной точки цилиндра верхнего рычага (центральные точки цилиндра – это узлы расчетной модели, расположенные в центре основания цилиндра, обращен-

ного к фланцу шпинделя); $\delta'_{L,d}$ – смещения нижней точки фланца левого шпинделя относительно центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta'_{r,u}$ – смещения верхней точки фланца правого шпинделя относительно центральной точки цилиндра верхнего рычага; $\delta'_{r,d}$ – смещения нижней точки фланца правого шпинделя относительно центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta_{L,u}$ – абсолютное смещение верхней точки фланца левого шпинделя; $\delta_{rch,u}$ – абсолютное смещение центральной точки цилиндра верхнего рычага; $\delta_{L,d}$ – абсолютное смещение нижней точки фланца левого шпинделя; $\delta_{rch,d}$ – абсолютное смещение центральной точки цилиндра нижнего рычага; $\delta_{r,u}$ – абсолютное смещение верхней точки фланца правого шпинделя; $\delta_{r,d}$ – абсолютное смещение нижней точки фланца правого шпинделя.

Имеющийся набор экспериментальных данных и специфика поставленной задачи идентификации позволяют решать её как задачу многоцелевой оптимизации. Для этого формируются

$$\Psi_i(u) = \left| \hat{T}_i(u) - T_i \right|, i = \overline{1,6} \text{ и } \Psi_7(u) = \left| \Delta_L(u) - D_1 \right|, \Psi_8(u) = \left| \Delta_r(u) - D_2 \right|, \quad (13)$$

где $\hat{T}_i(u)$ – модельные значения температур выбранной области геометрической модели; $\Delta_L(u), \Delta_r(u)$ – модельные значения относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя, соответственно.

Множество допустимых значений вектора параметров сужается из-за параметрических ограничений:

$$P = \{u : u_{id} \leq u_i \leq u_{iup}, i = \overline{1,9}\}, \quad (15)$$

где u_i -й аргумент; u_{id}, u_{iup} – нижняя и верхняя границы ограничений для аргумента; 9 – число

$$G = \{u : g_j(u) \leq 0; j = \overline{1,k}; g_j(u) \geq 0; j = \overline{r+1,z}\}, \quad (16)$$

где k, z – целочисленные значения; $g_j(u)$ – известные функции, позволяющие составить ограничения.

цели, критериальные ограничения и параметрические ограничения.

В качестве целей принимают две группы целей: температуры в шести точках несущей системы станка и относительные температурные смещения торцов фланцев левого и правого шпинделей. Значения температур и относительных температурных смещений были определены из натуральных экспериментов. Тогда вектор целей J примет вид:

$$J = \{J_i = T_i, i = \overline{1,6}, J_7 = D_1, J_8 = D_2\}, \quad (11)$$

где T_i – это экспериментальные значения температуры в фиксированных точках несущей системы станка; D_1, D_2 – экспериментальные значения относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя соответственно.

В общем виде вектор-функция целевых функционалов имеет вид:

$$\Psi(u) = (\Psi_1(u), \dots, \Psi_8(u)), \quad (12)$$

где $u \in R^m - m$ - мерный вектор входных параметров модели.

Для рассматриваемой задачи функционалы $\Psi_i(u)$ можно представить в виде:

Если выбрать некоторые значение погрешностей ε_T и ε_δ , то можно составить критериальные ограничения вида:

$$\Psi_i(u) \leq \varepsilon_T, i = \overline{1,6} \text{ и } \Psi_7(u) \leq \varepsilon_\delta, \Psi_8(u) \leq \varepsilon_\delta. \quad (14)$$

входных параметров 9 (в конкретной рассматриваемой задаче).

Несмотря на то, что при решении рассматриваемой задачи не требовалось задание функциональных ограничений, но для полноты представления модели представим их в общем виде:

Пересечение множеств P и G формирует новое множество допустимых значений вектора параметров $D = P \cap G$.

Таким образом, окончательно задача многоцелевой оптимизации при соблюдении критериальных ограничений (14) будет формулироваться следующим образом:

$$\min_{u \in D} \Psi(u) = \Psi(u^\circ), \quad (17)$$

где u° – вектор оптимальных значений параметров или координаты точки минимума для множества D .

4 этап – выбор метода оптимизации. На практике на выбор метода оптимизации влияют три основных фактора: особенность постановки задачи оптимизации, особенности собственно методов оптимизации и наличие готовой реализации метода оптимизации.

Был проведен анализ эффективности некоторых методов, реализованных в Ansys Twin Builder: квазиньютоновский метод оптимизации; поиск по шаблону; многоцелевой генетический алгоритм; метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; метод адаптивной многоцелевой оптимизации; метод адаптивной одноцелевой оптимизации.

Предварительно для всех выбранных методов оптимизации были проведены вычислительные эксперименты для большого числа итераций,

когда главным критерием выбора числа итераций являлась погрешность моделирования. Все методы оптимизации позволили обеспечить достаточную точность моделирования с погрешностью менее 5%. Однако для получения более характерных результатов было принято решение для всех методов назначить одинаковое число итераций и мониторить: погрешность моделирования и длительность вычислений. Для получения большей наглядности были выбраны три диапазона числа итераций 55, 80 и 100. Выбор минимального числа итераций, равного 55, является минимальным пороговым значением для некоторых методов оптимизации.

На рис. 6 приведены оптимальные решения в виде лепестковых диаграмм для всех выбранных методов оптимизации. Эти диаграммы позволяют наглядно оценить характер распределения решений в зависимости от используемого метода оптимизации. На рис. 7 приведены гистограммы параметров моделирования в зависимости от числа итераций. Первые четыре триады – это погрешность моделирования для четырех целей, в том числе для относительных температурных смещений торцов фланцев левого и правого шпинделя, а также для температур поддона и торцевых поверхностей шкивов ремённых передач. Последняя триада показывает вычислительные затраты – время в секундах.

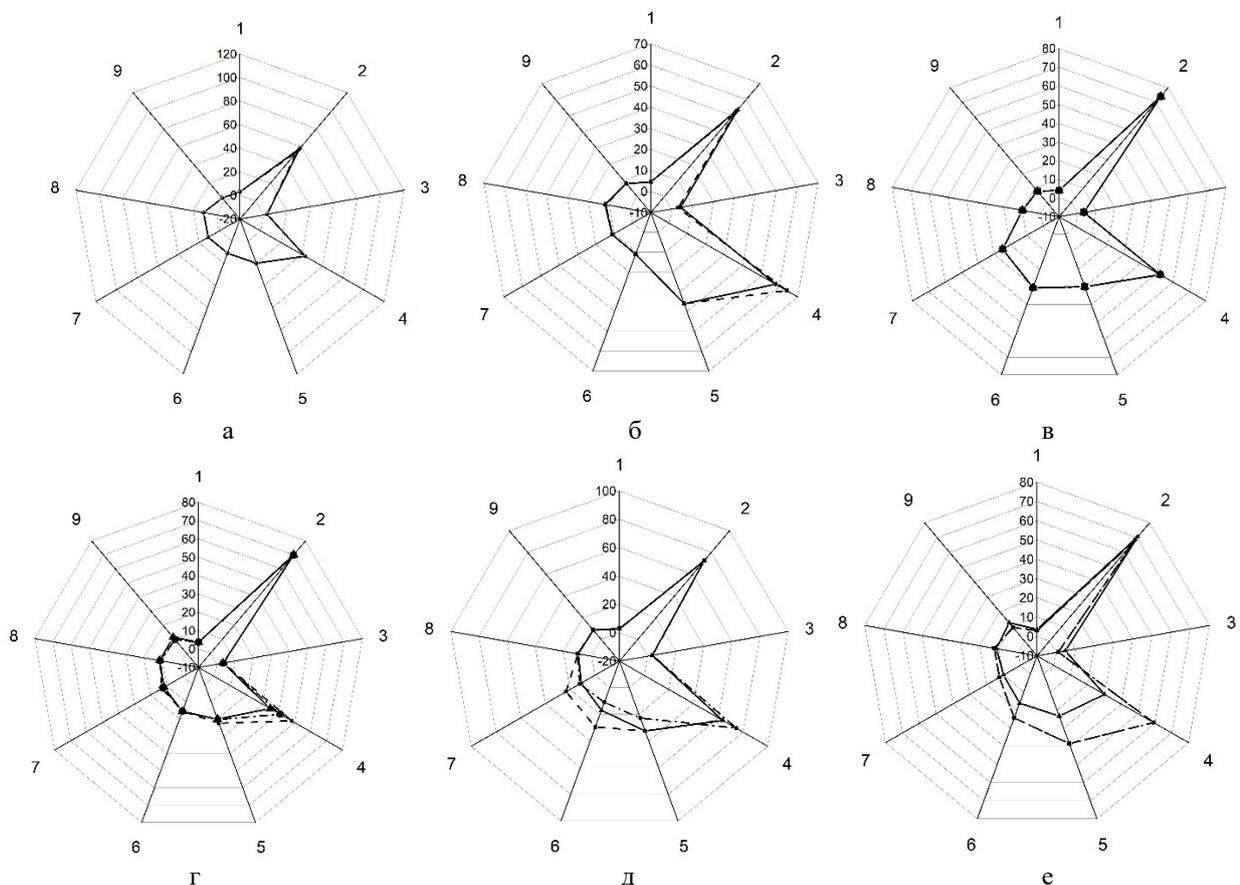


Рис. 6. Лепестковые диаграммы оптимальных решений:

а – квазиньютоновский метод; б – поиск по шаблону; в – многоцелевой генетический алгоритм;
 г – метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования;
 д – адаптивная многоцелевая оптимизация; е – адаптивная одноцелевая оптимизация

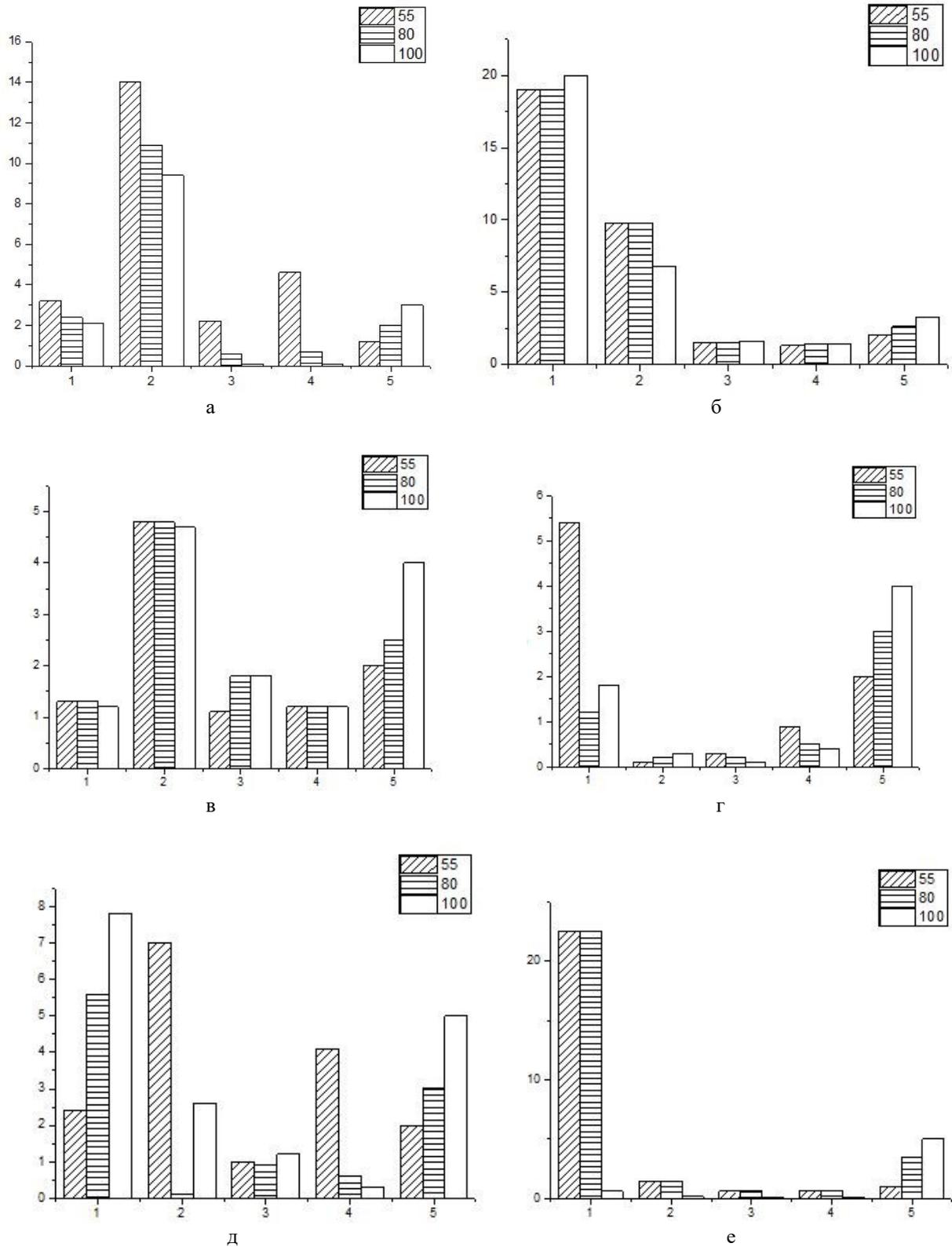


Рис. 7. Гистограммы параметров моделирования в зависимости от числа итераций:
 а – квазиньютоновский метод; б – поиск по шаблону; в – многоцелевой генетический алгоритм;
 г – метод частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования;
 д – адаптивная многоцелевая оптимизация; е – адаптивная одноцелевая оптимизация

В таблице 1 в качестве искоемых переменных (при решении задачи оптимизации) рассматриваются входные параметры модели для тепловых потоков, заданных на различных поверхностях геометрической модели станка. Нумерация первого столбца таблицы соответствует номерам переменных лепестковой диаграммы. Второй столбец содержит описание поверхностей, для которых заданы тепловые потоки. В общем случае можно было бы число искоемых переменных увеличить за счет коэффициентов теплоотдачи, задаваемых на поверхностях геометрической модели с конвективным теплообменом, но это существенно увеличивает вычислительные затраты на этапе формирования *fin*-файла. При проектировании расчётной модели станка передние и задние опоры шпиндельных узлов станка представлялись в виде двух цилиндров, с габаритными размерами подшипников, установленных в передних и задних опорах. Поэтому в параметрах с

4 по 7 используется термин «кольцо». Третий столбец содержит начальные значения входных параметров, а в четвертом и пятом столбцах приведены лучшие варианты оптимальных решений из анализа погрешности моделирования, приведенных на рис. 7.

Анализ полученных решений (рис. 7) показал, что при выборе относительно небольшого числа итераций наибольшую эффективность имеют методы адаптивной одноцелевой оптимизации и частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования. Для метода адаптивной одноцелевой оптимизации максимальная погрешность моделирования не превысила 1 %, а для метода частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования – не более 2 %. Вычислительные затраты по времени для второго метода оказались на 25 % меньше.

Таблица 1

Описание входных параметров

№ п/п входного параметра	Положение поверхности для теплового потока	Начальное значение, Вт	Решение для варианта «г» (оптимальное значение), Вт	Решение для варианта «е» (оптимальное значение), Вт
1	2	3	4	5
1	Поддон для сбора СОЖ	25	3,7	3,7
2	Внутренняя торцевая поверхность нижней части корпуса шпиндельной бабки	5	70,1	70,4
3	Фланцы шпинделей	25	3,5	4,7
4	Поверхность внутреннего кольца передней опоры	120	34,8	30
5	Поверхность наружного кольца передней опоры	80	20	23,3
6	Поверхность внутреннего кольца задней опоры	40	15,7	16,2
7	Поверхность наружного кольца задней опоры	20	11,6	10
8	Наружные поверхности рычага, на котором установлены два пневматических датчика перемещений	7	11,4	11,2
9	Торцевые поверхности шкивов ременных передач	4	11,4	12,4

Выводы.

1. Представлена методика построения цифровой модели станка с использованием FMI-стандарта на платформах Ansys Workbench и Ansys Twin Builder. Построенная цифровая модель показала эффективность решения задачи идентификации термоупругой модели. Представлены оптимальные решения для базовой термоупругой модели станка, построенной на решении нестационарной задачи термоупругости в связанной

постановке. При решении задачи идентификации в экстремальной постановке была обеспечена погрешность моделирования менее 1 %.

2. Проведен анализ эффективности шести методов оптимизации: квазиньютоновского метода; поиска по шаблону; многоцелевого генетического алгоритма; г) метода частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования; д) метода адаптивной многоце-

левой оптимизации; е) метода адаптивной одноцелевой оптимизации. Наибольшую точность моделирования позволил обеспечить метод адаптивной одноцелевой оптимизации. При возможности допущения чуть меньшей точности моделирования, но с меньшими временными затратами следует отдавать предпочтение методу частично-целочисленного последовательного квадратичного программирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие технологии цифровых двойников в ОДК // Режим доступа: <https://www.aviaport.ru/digest/2021/12/16/702483.html?ysclid=legxvrx5rx159670883>.
2. ОДК внедряет технологию цифрового двойника в разработку газотурбинных двигателей // Режим доступа: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryaet-tekhnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinykh-dvigatelye/>.
3. «Цифровой двойник» двигателя Су-57. Ростех внедряет технологию виртуального моделирования // Режим доступа: <https://naukatehnika.com/cifrovoj-dvoynik-dvigatelya-su-57.html?ysclid=lehbu04mss202753555>.
4. Gönninger P., Hillenbrand J., Betz-Mors T., Bischof P., Mohr L., Fleischer J. Auto-configuration of a digital twin for machine tools by intelligent crawling // In: Wulfsberg J.P., Hintze W., Behrens B.A. (eds) *Production at the leading edge of technology*. 2019. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_54.
5. Surjya Kanta Pal, Debasish Mishra, Arpan Pal, Samik Dutta, Debashish Chakravarty, Srikanta Pal. *Digital Twin – Fundamental Concepts to Applications in Advanced Manufacturing*. Springer Cham. 2022. 465 p. DOI: 10.1007/978-3-030-81815-9
6. Рудской А.И. Цифровая промышленность на основе цифровых двойников // Приборы. 2021. № 3 (249). С. 9–16.
7. Тихонов А.И., Сазонов А.А., Кузьмина-Мерлино И. Цифровое производство и искусственный интеллект в авиастроении // СТИН. 2022. № 2. С. 38–43.
8. Armendia M., Ghassempouri M., Ozturk E., Peysson F. *Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle*. Springer. 2019. 296 p. DOI: 10.1007/978-3-030-02203-7.
9. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531
10. Лесковец И.В. Цифровой двойник рабочего оборудования бульдозера // *Global Journal of Researches in Engineering*. 2020. Т. 20. № 4-J. С. 3.
11. Kul'ga K.S., Siluyanova M.V., Krivosheev I.A., Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N., Valiev A.A. *Digital Twins of CNC Machine Tools in the Reconfiguring of Aircraft Factories* // *Russian Engineering Research*. 2022. Vol. 42. Pp. 715–720. DOI: 10.3103/S1068798X22070188
12. Акинцева А.В., Переверзев П.П., Дегтярева-Кашутина А.С. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 4. С. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106
13. Трефилов С.А., Лecomцев П.В., Никитин Ю.Р. Цифровой двойник мехатронного устройства на основе алгоритма прогнозирования по малым обучающим выборкам // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2020. № 3 (11). С. 39–49.
14. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. Ю.Г. Кабалдина, Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. 2018. 271 с.
15. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Аносов М.С., Колчин П.В. Цифровой двойник оборудования как основа для потребителя в условиях цифрового производства // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 9. С. 394–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402
16. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М. Цифровой двойник процесса стружкообразования // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 81–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-11-81-8
17. Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кабалдин Ю.Г., Галкин А.А., Ключкова Н.С. Разработка цифрового двойника процесса 3D-печати электродуговой наплавкой на станке с ЧПУ с использованием методов машинного обучения и численного моделирования // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67–2. С. 55–62. DOI: 10.18411/lj-11-2020-57
18. Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Чурсин А.А. Цифровой двойник 3D-печати на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 47–49.
19. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Известия высших учебных

заведений. Машиностроение. 2019. № 4 (709). С. 11–17. DOI:10.18411/lj-12-2018-177

20. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника станка с ЧПУ на основе методов машинного обучения // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55

21. Ostasevicius V. Digital Twins in Manufacturing. Virtual and Physical Twins for Advanced Manufacturing. Springer. 2022. 365 p. doi.org/10.1007/978-3-030-98275-1

22. Xue R., Zhou X., Huang Z., Zhang F., Tao F., Wang J. Digital twin-driven CNC spindle performance assessment // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. Pp. 1821–1833. DOI:10.1007/s00170-021-08403-6

23. Guo M., Fang X., Hu Z., Li Q. Design and research of digital twin machine tool simulation and monitoring system // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 124. Pp. 4253–4268. DOI:10.1007/s00170-022-09613-2

24. Wei Y., Hu T., Wei S., Ma S., Wang Y. Digital twin technology applicability evaluation method for CNC machine tool // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 131. Pp. 5607–5623. DOI:10.1007/s00170-022-10050-4

25. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using

strategy // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2019. Vol. 10. Pp. 1129–1140. DOI:10.1007/s12652-018-0946-5

26. Tong X., Liu Q., Pi S., Xiao Y. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin // Journal of Intelligent Manufacturing. 2020. Vol. 31. Pp. 1113–1132. DOI: 10.1007/s10845-019-01500-0

27. Modelica Association. Functional mock-up interface for model exchange and co-simulation. Functional mock-up interface 2.0.2., Режим доступа: <https://fmi-standard.org/>.

28. Поляков А.Н. Идентификация термодинамической системы координатно-расточного станка // Технология машиностроения. 2003. №4. С. 12–19.

29. Никитина И.П., Поляков А.Н. Экспериментальное исследование температурных и точностных характеристик двустороннего торцешлифовального станка // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. № 11. С. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120

30. Ehrgott M. Multicriteria Optimization: Second Edition. Springer. 2005. 323 p.

31. Malczewski J., Rinner C. Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science: Advances in Geographic Information Science. Springer. 2015. 335 p.

32. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь. 1992. 504 с.

Информация об авторах

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, профессор. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Никитина Инна Петровна, доцент кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: innanikitina@list.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Позевалкин Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной информатики в экономике и управлении. E-mail: vorgpost1@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила 15.08.2024 г.

© Поляков А.Н., Никитина И.П., Позевалкин В.В., 2024

Polyakov A.N., *Nikitina I.P., Pozevalkin V.V.

Orenburg state University

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

CREATION OF A DIGITAL MODEL OF THE MACHINE TOOL THERMAL DEFORMATION SYSTEM

Abstract. The paper presents a methodology for building a digital model of the thermo-deformation system of a machine tool used in the creation of digital twins of machine tools for which their thermoelastic behavior is relevant, based on the solution of the thermoelasticity problem. Ansys Workbench and Ansys Twin Builder platforms are used as special software that allows you to create a digital model. A double-sided face

grinding machine was used as an object of modeling, for which experimental studies were conducted earlier. The experimental data allowed us to form the target values of the optimization problem. A general methodology for building a digital model based on the use of the FMI standard for the exchange of dynamic libraries has been developed. The paper shows the practical application of the digital model of the machine tool to solve the problem of identification of the thermo-deformation model of the machine tool. The identification problem was solved in an extremal formulation. The analysis of the effectiveness of the use of six optimization methods is presented: the Quasi-Newton method; Pattern search; Multi-Objective Genetic Algorithm; Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming; Adaptive Multiple-Objective; Adaptive Single-Objective. The methods of Mixed-Integer Sequential Quadratic Programming and Adaptive single-Objective were preferred in terms of efficiency. Their application allows to obtain the refined parameters of the model with the error of achieving the target values of modeling less than 2 %.

Keywords: Digital Twins, Digital models, the thermo-deformation model of the machine tool, optimization methods

REFERENCES

1. Development of digital twin technology in UEC. Access mode: <https://www.aviaport.ru/digest/2021/12/16/702483.html?ysclid=legxvrx5rx159670883>. (rus)
2. UEC introduces digital twin technology in gas turbine engine development. Access mode: <https://rostec.ru/news/odk-vnedryaet-tekhnologii-tsifrovogo-dvoynika-v-razrabotku-gazoturbinnikh-dvigatelya/>. (rus)
3. «Digital Twin» of Su-57 Engine. Rostec Introduces Virtual Modeling Technology. Access mode: <https://naukatehnika.com/cifrovoy-dvoynik-dvigatelya-su-57.html?ysclid=lehbu04mss202753555>. (rus)
4. Gönninger P., Hillenbrand J., Betz-Mors T., Bischof P., Mohr L., Fleischer J. Auto-configuration of a digital twin for machine tools by intelligent crawling. In: Wulfsberg J.P., Hintze W., Behrens BA. (eds) Production at the leading edge of technology. 2019. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-60417-5_54
5. Surjya Kanta Pal, Debasish Mishra, Arpan Pal, Samik Dutta, Debashish Chakravarty, Srikanta Pal. Digital Twin – Fundamental Concepts to Applications in Advanced Manufacturing. Springer Cham. 2022. 465 p. DOI: 10.1007/978-3-030-81815-9
6. Rudskoj A.I. Digital Industry Based on Digital Twins [Tsifrovaya promyshlennost na osnove tsifrovyykh dvoynikov]. Pribory. 2021. No. 3 (249). Pp. 9–16. (rus)
7. Tikhonov A.I., Sazonov A.A., Kuzmina-Merlino I. Digital Manufacturing and Artificial Intelligence in Aviation [Tsifrovoe proizvodstvo i iskusstvennyj intellekt v aviastroenii]. STIN. 2022. No. 2. Pp. 38–43. (rus)
8. Mikel Armendia, Mani Ghassempouri, Erdem Ozturk, Flavien Peysson. Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle. Springer. 2019. 296 p. DOI: 10.1007/978-3-030-02203-7
9. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, Use Cases [Tsifrovye dvoyniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsenarii ispolzovaniya]. Izvestiya vuzov. Priborostroenie. 2021. Vol. 64. No. 7. Pp. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (rus)
10. Leskovets I.V. Digital twin of a bulldozer's working equipment [Tsifrovoy dvoynik rabochego oborudovaniya buldozera]. Global Journal of Researches in Engineering. 2020. Vol. 20. No. 4-J. P. 3. (rus)
11. Kul'ga K.S., Siluyanova M.V., Krivosheev I.A., Kuritsyna V.V., Kuritsyn D.N., Valiev A.A. Digital Twins of CNC Machine Tools in the Reconfiguring of Aircraft Factories. Russian Engineering Research. 2022. Vol. 42. Pp. 715–720. DOI: 10.3103/S1068798X22070188
12. Akintseva A.V., Pereverzev P.P., Degtyareva-Kashutina A.S. Digital twin of the shaping of the machined surface of a non-rigid shaft with an elliptical profile during cylindrical plunge grinding [Tsifrovoy dvoynik formoobrazovaniya obrabatyvaemoj poverkhnosti nezhestkogo vala s ellipsnym profilem pri kruglom vreznom shlifovanii]. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova]. 2021. Vol. 19. No. 4. Pp. 98–106. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-98-106. (rus)
13. Trefilov S.A., Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R. Digital twin of a mechatronic device based on a prediction algorithm using small training samples [Tsifrovoy dvoynik mekhatronnogo ustrojstva na osnove algoritma prognozirovaniya po malym obuchayushchim vyborkam]. Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino- priborostroenii. 2020. No. 3 (11). Pp. 39–49. (rus)
14. Artificial Intelligence and Cyber-Physical Machining Systems in Digital Manufacturing: Monograph. Edited by Yu.G. Kabaldin. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev. 2018. 271 p. (rus)

15. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M., Anosov M.S., Kolchin P.V. Digital twin of equipment as a basis for the consumer in the context of digital production [Tsifrovoj dvojn timer oborudovaniya kak osnova dlya potrebitelya v usloviyakh tsifrovogo proizvodstva]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2020. Vol. 74. No. 9. Pp. 394–402. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-9-394-402. (rus)
16. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. Digital twin of the chip formation process [Tsifrovoj dvojn timer protsessa struzhkoobrazovaniya]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2020. No. 11. Pp. 81–86. DOI: 10.36652/0042-4633-2020-11-81-8. (rus)
17. Shatagin D.A., Anosov M.S., Kabaldin Yu.G., Galkin A.A., Klochkova N.S. Development of a digital twin of the CNC arc welding 3D printing process using machine learning and numerical modeling methods [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer protsessy 3D-pechati elektrodugovoy naplavkoj na stanke s CHPU s ispolzovaniem metodov mashinnogo obucheniya i chislennogo modelirovaniya]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020. No. 67–2. Pp. 55–62. DOI: 10.18411/lj-11-2020-57. (rus)
18. Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Anosov M.S., Chursin A.A. Digital Twin of 3D Printing on CNC Machines [Tsifrovoj dvojn timer 3D-pechati na stankakh s CHPU]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. No. 7. Pp. 47–49. (rus)
19. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Development of a digital twin of a cutting tool for machining production [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer rezhushchego instrumenta dlya mekhanoobrabatvyvayushchego proizvodstva]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*. 2019. No. 4 (709). Pp. 11–17. DOI: 10.18411/lj-12-2018-177. (rus)
20. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kuzmishina A.M. Development of a digital twin of a CNC machine based on machine learning methods [Razrabotka tsifrovogo dvojn timer stanka s CHPU na osnove metodov mashinnogo obucheniya]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. Vol. 19. No. 1. Pp. 45–55. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-45-55. (rus)
21. Ostasevicius V. *Digital Twins in Manufacturing. Virtual and Physical Twins for Advanced Manufacturing*. Springer. 2022. 365 p. DOI: 10.1007/978-3-030-98275-1
22. Xue R., Zhou X., Huang Z., Zhang F., Tao F., Wang J. Digital twin-driven CNC spindle performance assessment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. Pp. 1821–1833. DOI: 10.1007/s00170-021-08403-6
23. Guo M., Fang X., Hu Z., Li Q. Design and research of digital twin machine tool simulation and monitoring system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 124. Pp. 4253–4268. DOI: 10.1007/s00170-022-09613-2
24. Wei Y., Hu T., Wei S., Ma S., Wang Y. Digital twin technology applicability evaluation method for CNC machine tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. Pp. 5607–5623. DOI: 10.1007/s00170-022-10050-4
25. Luo W., Hu T., Zhang C., Wei Y. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. Vol. 10. Pp. 1129–1140. DOI: 10.1007/s12652-018-0946-5
26. Tong X., Liu Q., Pi S., Xiao Y. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. Vol. 31. Pp. 1113–1132. DOI: 10.1007/s10845-019-01500-0
27. Modelica Association. Functional mock-up interface for model exchange and co-simulation. Functional mock-up interface 2.0.2., Access mode: <https://fmi-standard.org/>.
28. Polyakov A.N. Identification of the thermodynamic system of a jig boring machine [Identifikatsiya termodinamicheskoy sistemy koordinatno-rastochnoy stanka. *Tekhnologiya mashinostroeniya*]. 2003. No. 4. Pp. 12–19. (rus)
29. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Experimental study of temperature and precision characteristics of a double-sided end grinding machine [Eksperimentalnoe issledovanie temperaturnykh i tochnostnykh kharakteristik dvustoronnego tortseshlifovalnogo stanka]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 11. Pp. 112–120. DOI: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-112-120. (rus)
30. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization: Second Edition*. Springer. 2005. 323 p.
31. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science: Advances in Geographic Information Science*. Springer. 2015. 335 p.
32. Shtojer R. *Multicriteria Optimization: Theory, Computations and Applications*. M.: Radio i svyaz. 1992. 504 p. (rus)

Information about the authors

Polyakov, Alexander N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University, Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Nikitina, Inna P. PhD, Assistant professor. E-mail: innanikitina@list.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Pozevalkin, Vladimir V. PhD, Senior lecturer. E-mail: vorgpost1@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received 15.08.2024

Для цитирования:

Поляков А.Н., Никитина И.П., Позевалкин В.В. Создание цифровой модели термомодеформационной системы станка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 116–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131

For citation:

Polyakov A.N., Nikitina I.P., Pozevalkin V.V. Creation of a digital model of the machine tool thermal deformation system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 116–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-116-131

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141

^{1,*}Бондаренко Ю.А., ²Бестужева О.В., ¹Баранов Д.С.¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kdsm2002@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ШАРОВЫХ ТРУБНЫХ МЕЛЬНИЦ

Аннотация. Важным этапом развития предприятий является повышение надежности оборудования в процессе эксплуатации. Частая необходимость в ремонте помольного оборудования промышленности строительных материалов влечет за собой длительные простои. Основными задачами этапа являются определение основных факторов, влияющих на возникновение неисправностей, и установление рациональных режимов работы оборудования. Для оценки эксплуатационного потенциала оборудования, вероятности безотказной работы, сокращения времени ремонтных простоев и повышения межремонтного ресурса необходимо спрогнозировать остаточный ресурс оборудования, основанный на методе аппроксимации изменения параметров его технического состояния при эксплуатации. Для этого существует алгоритм функционирования системы мониторинга и контроля технического состояния деталей и узлов шаровых трубных мельниц, позволяющий оценить параметры с погрешностью 9 %. Только при выполнении заданного комплекса факторов возможно прогнозирование остаточного ресурса. Поэтапный сбор информации о зависимости прямых и косвенных параметрах технического состояния мельницы, обучающий эксперимент и альтернативные подходы необходимы для статистической обработки полученных данных, определения параметров функции распределения и оценки достоверной вероятности с минимальным объемом выборки из генеральной совокупности. При проведении периодического контроля показателей технического состояния цапфы опорного узла нужно учитывать погрешности средств измерения, метода выполнения исследований и др.

Ключевые слова: шаровые трубные мельницы, повышение надежности, режимы работы оборудования, прогнозирование остаточного ресурса оборудования

Введение. Помольное оборудование входит в состав технологических линий при производстве продуктов промышленности строительных материалов [1]. В результате эксплуатации на работу шаровых трубных мельниц оказывают большое влияние динамические нагрузки, приводящие к нарушению режима функционирования, снижению производительности, появлению необходимости данного оборудования в ремонте, приводящей к длительным простоям [2]. Поэтому повышение надежности помольного оборудования в процессе эксплуатации является основой повышения его производительности.

Повышение эксплуатационной надежности, долговечности и ремонтпригодности оборудования промышленности строительных материалов, к которому относятся и крупногабаритные шаровые трубные мельницы, является важным для развития предприятий [3]. В связи с тем, что одним из основных узлов помольного оборудования являются подшипниковые опорные узлы, необходимо понять процесс формирования отказов и неисправностей как самих опорных узлов, так и одной из важных деталей, которая входит в состав сборочной единицы «опорный узел», а именно цапфы и определить основные факторы и причины, приводящие к возникновению и разви-

тию этих неисправностей [3]. При этом необходимо установить рациональные режимы и условия работы помольного оборудования, провести уточнение прочностных расчетов, для подтверждения условий работы оборудования [5].

Изучение напряженно-деформированного состояния подшипниковых узлов помольных мельниц дает возможность оценить эксплуатационный потенциал оборудования, вероятность его безотказной работы, в конечном итоге снизить продолжительность ремонтного цикла, времени ремонтных простоев трубных мельниц, разработать мероприятия по ремонтному обслуживанию для всех видов ремонтов и увеличить межремонтный ресурс.

Методика. Помольное оборудование, как и другое оборудование, имеет установленный технологической документацией уровень надежности. В процессе его эксплуатации, в течении времени, возникают различного вида отказы этого оборудования, наиболее часто встречаемые – это износные отказы (постепенные). Для снижения их негативного воздействия требуется проведение технического обслуживания и различного вида ремонтов (капитального, сезонного и др.). При увеличении количества возникновения отказов в единицу времени способность помольного оборудования выполнять свои заданные функции

снижается, и в дальнейшем эксплуатации оборудования становится невозможной. Проведение ремонтных восстановительных работ крупногабаритного помольного оборудования является дорогостоящим и затратным по продолжительности времени. Требования по надежности — это требования, установленные в нормативной документации, к количественным значениям показателей, характеризующих такие свойства объекта, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость, которые определяют надежность объекта в целом [6]. При изучении показателей надежности оборудования по режимам функционирования оборудование классифицируют на оборудование непрерывного длительного применения, оборудование многократного циклического применения и оборудование однократного применения. Шаровая трубная мельница в процессе эксплуатации является оборудованием непрерывного действия (применения). При исследовании показателей надежности всегда необходимо учитывать является или нет рассматриваемое оборудование восстанавливаемым (ремонтируемым), или данное оборудование относится к невозстанавливаемому. Трубная мельница является восстанавливаемым (ремонтируемым) промышленным оборудованием. Оборудование такого типа характеризуется таким показателем надежности, как долговечность. Выбор номенклатуры показателей надежности исследуемого изделия проводят, взяв за основу классификацию оборудования по признакам, которые характеризуют назначение и принцип работы этого оборудования, последствия, к которым может привести возникший при эксплуатации оборудования отказ, число возможных состояний оборудования по работоспособности, которые можно учесть в процессе его функционирования; длительности процесса достижения предельного состояния, возможности восстановления работоспособного состояния изделия после возникновения отказа; возможности и способа восстановления срока службы ремонтируемого оборудования; режимов и условий эксплуатации и др. При изучении характера основных процессов, протекающих в эксплуатируемом оборудовании и обуславливающих его переход в предельное состояние, изделия классифицируют на: стареющие; изнашиваемые; стареющие и изнашиваемые одновременно.

Известно, что одним из основных показателей, которые характеризуют надежность любых технических систем является показатель долговечности. Оборудование, которое используется по назначению и находится в эксплуатации в течение определенного промежутка времени, мо-

жет достичь своего предельного состояния. В результате этого возникают негативные последствия, которые приводят к таким процессам, как старение и изнашивание этого оборудования одновременно. Одной из характеристик этого процесса является остаточный ресурс исследуемого оборудования. Остаточный ресурс представляет собой сумму значений наработки рассматриваемой технической системы от начала мониторинга ее технического состояния до того времени, пока в данной технической системе не наступит момент предельного состояния. Эксплуатация технических систем, которые достигли своего предельного состояния, недопустима. После того, как был проведен мониторинг технического состояния объекта, остаточный ресурс характеризует запас допустимой наработки технической системы, в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технико-эксплуатационных показателей.

Остаточный ресурс технических систем, который характеризует модификацию их основных параметров, изменение которых приводит к негативным последствиям для технического состояния этого объекта, возможно прогнозировать. Для этого следует использовать следующие нормативные указания: РД 26.260.004-91 «Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации». При эксплуатации оборудования в течении длительного промежутка времени неизбежно возникают различного вида повреждения, нарушения работоспособности узлов и деталей, входящих в конструкцию этого оборудования. Эти негативные факторы возникают даже в том случае, когда на предприятиях, на которых конструировали, изготавливали оборудование с соблюдением всех норм и требований технологической и конструкторской документации, в результате чего в оборудовании отсутствовали дефекты конструирования (наиболее отрицательно влияющие на конструкцию), а также при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации [7–9]. К потере работоспособности оборудования, к возникновению его сложного напряженного состояния приводят некоторые процессы, которые протекают в технологических системах и связаны с их эксплуатацией. Так, например, в этих системах могут возникать температурные напряжения, деформации. Скорость протекания технологических процессов, высокие показатели давления и температурных характеристик, особенно если эти показатели оказывают влияние на эксплуатируемую

техническую систему продолжительный промежуток времени, приводят к изменению механических характеристик материала оборудования.

Такие ГОСТы, как ГОСТ 20911-89, ГОСТ 16504-81, ГОСТ 27.002-89, позволяют использовать разработанные методики прогнозирования такого показателя, как остаточный ресурс технических систем. В этих методиках прогноз остаточного ресурса производится на основании взаимосвязи ресурса и наработки технической системы. Для того, чтобы установить причины потери работоспособности технической системы, а также диапазон оказывающих влияние на дан-

ную систему нагрузок, необходимо найти значение остаточного ресурса исследуемого оборудования.

Покажем последовательность исследования состояния технического объекта, узлов и деталей, входящих в его состав, на примере эксплуатации шаровой трубной мельницы (рис. 1). Эта последовательность должна быть использована для нахождения величины остаточного ресурса, при этом необходимо ввести следующие обозначения: N – функция надежности, S – исследуемый показатель надежности, i – порядковый номер исследуемого показателя надежности.

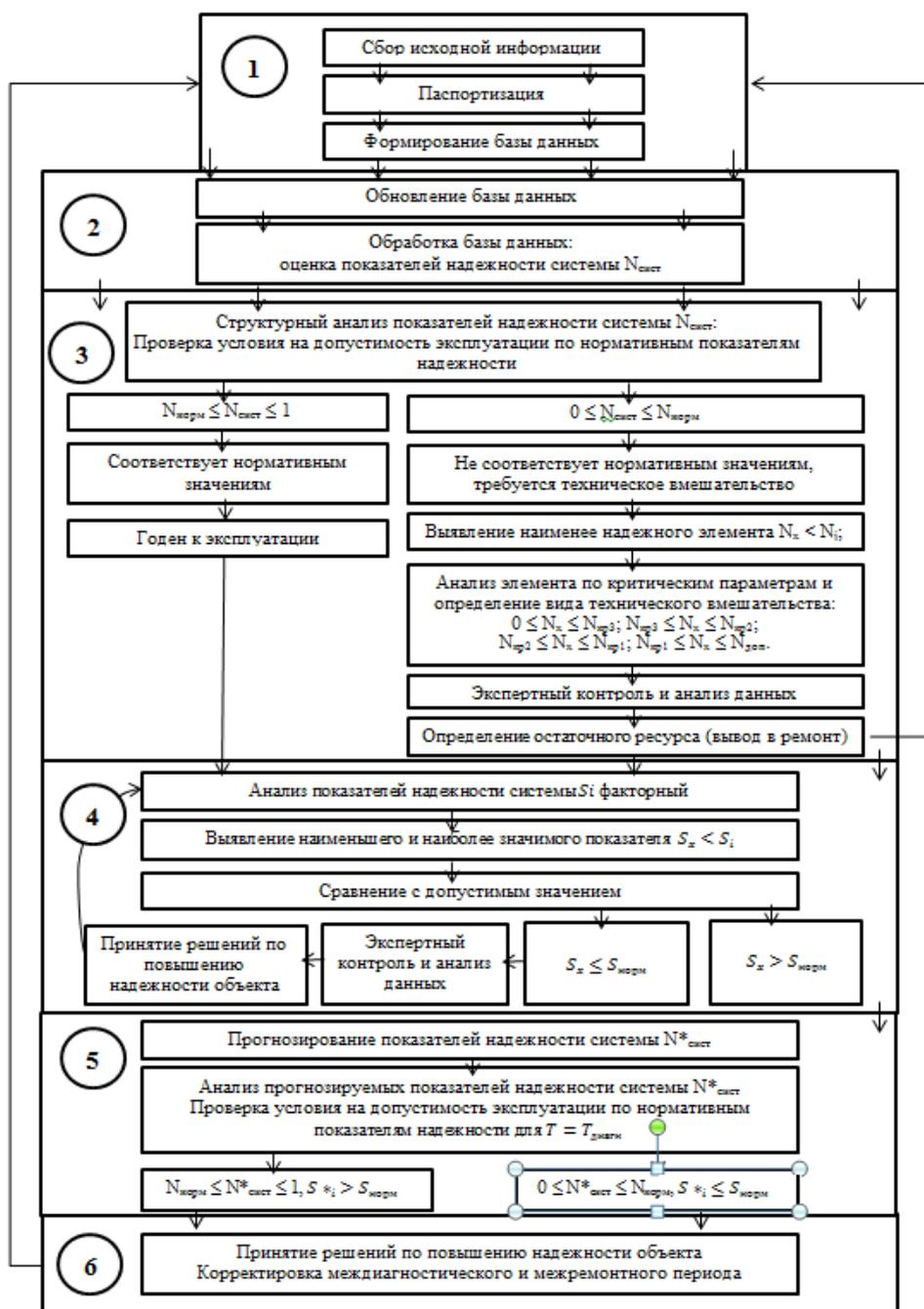


Рис.1. Последовательность проведения исследования технического состояния деталей и узлов находящейся в эксплуатации шаровой трубной мельницы при установлении значения остаточного ресурса по показателям надежности

Состав показателей S_i определяется для каждого оборудования с учетом его функциональных характеристик.

Прогнозирование величины остаточного ресурса возможно в том случае, если выполняются комплексно следующие факторы: известны параметры, определяющие техническое состояние мельницы и критерии ее предельного состояния, есть возможность периодического контроля параметров мельницы.

Известны два способа, которые применяют для прогнозирования остаточного ресурса в зависимости от срока эксплуатации одной из основных деталей опорного подшипникового узла мельницы – цапфы опоры: дефект, выраженный в незначительном износе внешней рабочей поверхности цапфы при прогнозировании ее остаточного ресурса, оценивается по нагруженности, при наличии значительных дефектов дополнительно исследуется степень поврежденности мельницы. Рациональным является второй способ, так как он позволяет дать более точный прогноз и определить дополнительный резерв ресурса цапфы опорного узла. Дополнительная информация в виде колебаний наблюдаемых параметров повышает достоверность прогнозирования [10].

Прогнозирование остаточного ресурса осуществляется в ходе эксплуатации мельницы при проведении заданных периодических мониторинга диапазона изменений показателей технического состояния деталей и узлов, входящих в ее конструкцию, а также для определения значения критерия предельного состояния. Установление максимально значимых показателей и заданных исходных параметров дает возможность проанализировать совокупность факторов, влияющих на эксплуатируемый технический объект при определении прогноза остаточного ресурса.

Информативными параметрами для прогнозирования и оценки остаточного ресурса помольных агрегатов могут быть: размеры глубинной коррозии, количественная оценка механического износа, физико-механические свойства материала деталей, количество циклов нагружения, деформации и напряжения в деталях.

На следующем этапе после установления параметров технического состояния мельницы необходимо установить критерии предельного состояния объекта, то есть некую общность факторов, свойств и признаков, которые дают возможность применения в эксплуатации по назначению, постановки на ремонт или снятие с эксплуатации.

Прогнозирование остаточного ресурса шаровых трубных мельниц на основании входных

данных возможно реализовать следующим способом: если имеются результаты периодических измерений прямых и косвенных параметров, а также установлена иерархия этих параметров; известны данные периодических измерений прямых и косвенных параметров, обучающего эксперимента с измерением параметров технического состояния оборудования и зависимости этих параметров; существуют результаты периодических измерений прямых и косвенных параметров, обучающего эксперимента без определения зависимости этих параметров.

Применяем РД 50-490-84 «Методические указания. Техническая диагностика. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам», где показан общий вид соотношений при расчете остаточного ресурса. На основании [11] определим порядок прогнозирования остаточного ресурса цапфы по изменению его параметров. Используя определения показателей технического состояния шаровых трубных мельниц, с последующим учетом значений замеров и с нахождением значений ресурсов среднего и гарантированного, возможно провести прогнозирование и получить численное значение остаточного ресурса оборудования. Для того, чтобы установить функцию распределения и ее параметры, найти оценку доверительной вероятности, оценку достоверности максимального значения параметра технического состояния исследуемого объекта, который находится в эксплуатации, при условии, что объем выборки замеров будет наименьшим, следует провести статистическую обработку полученных данных.

Статистическая обработка результатов измерений заключается в определении минимального необходимого числа измерений (объема выборки из генеральной совокупности) и выявления однородности полученной выборки по критериям однородности; определения коэффициента вариации и параметров (среднего арифметического значения, дисперсии и др.) распределения.

Выбор минимального числа объектов наблюдения (точек поверхности для измерений) проводим по [12] с учетом установленной доверительной вероятности оценки, допустимой ошибки и степени неравномерности разрушения поверхности. При этом коэффициент вариации при малой неравномерности должен быть не более 0,2, величина доверительной вероятности составляет 0,95, а величина максимальной допустимой относительной ошибки составит 0,05.

Далее рассмотрим связь между расчетным сроком службы цапфы опорного блока мельничного агрегата и ее остаточным ресурсом. В связи с тем, что аналитические прочностные расчеты и

расчеты на износостойкость этой детали в условиях ее эксплуатации при учете действующих показателей, установленных в нормативно-технической документации, а также с учетом рекомендаций к расчетам сроков службы агрегатов, когда эти расчеты проводятся, учитывая наиболее неблагоприятные режимы нагружения, остаточный ресурс цапфы может превышать расчетный срок службы. Если шаровая трубная мельница на предприятии в условиях эксплуатации функционирует при соблюдении всех норм и правил, то действительные режимы нагружения цапфы будут значительно ниже расчетных. В связи с этим, цапфа подшипникового опорного узла не полностью вырабатывает свой ресурс и поэтому возникает резерв по остаточному ресурсу.

Далее определим, какие условия необходимо реализовывать для выполнения прогнозирования остаточного ресурса цапфы. Во-первых, необходимо обеспечивать проведение периодического контроля показателей технического состояния цапфы опорного узла. Следует определить критерии предельного состояния мельницы. Необходимо определить факторы, которые будут

характеризовать показатели технического состояния.

Основная часть. Для того, чтобы провести прогнозирование остаточного ресурса цапфы воспользуемся типовой схемой. В качестве первоначальных сведений следует через рассчитанные, установленные интервалы эксплуатации объекта проводить измерения величины параметров износа поверхности цапфы. Это позволяет экстраполировать зависимость предельно допустимой величины возникших повреждений, связанных с износом, во времени.

Эта методика позволяет устанавливать действительные максимальные значения износа при известной зависимости параметров повреждений во времени, и поэтому возможна фиксация точных оценок показателей надежности.

Следует определить вид закономерности износа цапфы в течении времени эксплуатации и других видов разрушения. Графическая зависимость общего вида (Рис. 1) износа цапфы от срока службы: $h(t) = h_0 + C \times t$, где h_0 и C – постоянные величины для определенных условий эксплуатации.

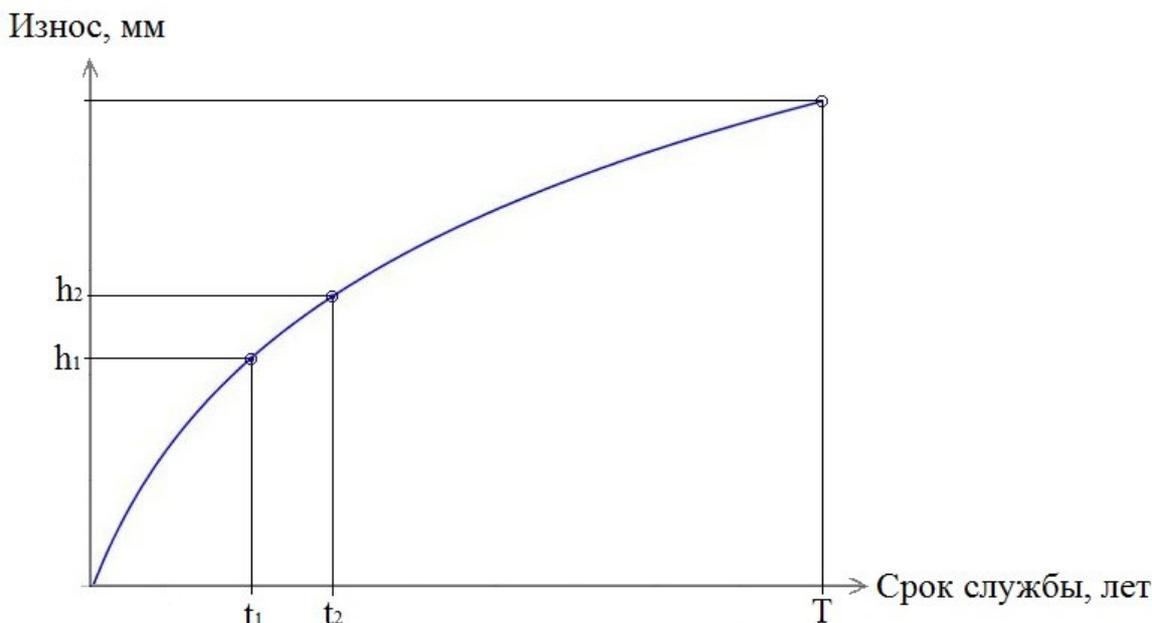


Рис. 1. Общая схема прогнозирования остаточного ресурса изделий: t – продолжительность эксплуатации объектов в течении времени; h – величина возникших при эксплуатации повреждений и дефектов (износ)

Если внешняя рабочая сопрягаемая поверхность цапфы опорного узла имеет незначительные повреждения (например, дефекты в виде рисок и неглубоких забоин), то прогнозирование остаточного ресурса в зависимости от периода эксплуатации цапфы мельничного агрегата определяется по нагруженности, тогда как при наличии значительных повреждений (например, значительная величина постепенного износа) совместно исследуется степень поврежденности оборудования. Второй вариант проведения ис-

следований имеет преимущества, так как позволяет проводить прогнозирование точнее, и возникает вероятность определения дополнительного резерва ресурса цапфы при ее эксплуатации. Чтобы достоверность прогноза была не ниже установленной, следует применить метод прогнозирования, основанный на вероятностных оценках. Для увеличения достоверности прогнозирования применяют добавочную информацию в виде интервалов рассеяния наблюдаемых параметров. В качестве показателей достоверности контроля степени соответствия результатов

оценки технического состояния оборудования рассмотрена точность измерений (доверительный интервал для параметра технического состояния) и доверительная вероятность, которая должна быть не менее 0,95 % [13].

При расчете остаточного ресурса цапфы опорного узла могут возникнуть погрешности двух видов. Первая погрешность – это погрешность средств измерения, погрешность метода выполнения исследований, погрешность, вызванная статистическими отклонениями диапазона параметров при определении показателя технического состояния. Эта погрешность относится к объективной. К субъективной погрешности относится погрешность, которая вызвана неточностями рабочего, производящего расчет. Диапазон результатов контролируемых параметров можно обосновать и тем, что существуют различные условия нагружения разных участков поверхности (концентрация температур, напряжений и деформаций).

Количество замеров определяют исходя из пропорциональности площади исследуемой поверхности. Замеры проводят выборочно, достоверность контроля повышается с увеличением количества измерений: больше число измерений, тем выше достоверность. Для помольных агрегатов принимают выборочный контроль параметров, так как полный контроль параметра возможен только для некоторых участков поверхности. Ориентировочная оценка совершается по приспособлениям осмотра состояния цапфы, уточненную оценку проводят после обработки статистических данных.

Прогнозирование процесса потери работоспособности цапфы, который проявляется как износ и показывает ухудшение параметров технического состояния эксплуатируемой технической системы, осуществляется с применением метода аппроксимации мониторинга этих параметров, который представлен в ГОСТ 27.302-86 [14]. Этот метод состоит в показе модификации параметра технического состояния объекта с приближительным описанием исследуемого процесса случайной функцией $Y(t)$:

$$Y(t) = Kt^\alpha + z(t), \quad (1)$$

где t – наработка исследуемого объекта; K – случайное значение показателя скорости трансформации параметра; α – показатель степени, описывающий некоторый конструктивные характеристики исследуемого объекта; $z(t)$ – процесс несовпадений с аппроксимирующей степенной функцией реальных значений параметра технического состояния.

Средний остаточный ресурс эксплуатируемого объекта можно определить по таким характеристикам, как параметр технического состояния и наработка на момент проведения мониторинга:

$$T_{\text{ост}}^{\text{ср}} = t_k \left[\left(\frac{Y_n}{Y_k} \right)^{1/2} - 1 \right] K_t, \quad (2)$$

где t_k – наработка объекта, находящегося в эксплуатации на момент проведения мониторинга параметра; Y_n , Y_k – исследуемый параметр в заданный начальный момент времени и на момент проведения мониторинга; K_t – поправочный коэффициент.

Если задать условие, что изменение исследуемого параметра к моменту проведения мониторинга составляет:

$$Y_k < 0,5Y_n. \quad (3)$$

Этот метод прогнозирования дает возможность определить параметры с погрешностью меньше 9 %. Оценка остаточного ресурса исследуемого объекта проводится на основе статистической обработки значений параметров технического состояния с вычислением численных значений показателей по уравнениям.

После получения численного значения параметра технического состояния объекта строят графические зависимости наблюдений (Рис. 2), на которых устанавливают предельно допустимые уровни значений параметров. Результаты наблюдения статистически обрабатывают: определяют среднюю скорость изменения параметра, среднее квадратическое отклонение скорости, коэффициент вариации скорости изменения параметра, проверяют однородность результатов наблюдения, строят графические зависимости, определяют доверительные границы скорости изменения параметра технического состояния.

В результате обработки полученных в эксплуатации технического объекта результатов появляется возможность рассчитать гарантированный и средний остаточный ресурс оборудования [15].

Выводы.

1. Подтверждено определение параметров технического состояния в качестве исходных данных на основе проведенного анализа методов прогнозирования остаточного ресурса помольного оборудования.

2. Рассмотренный алгоритм прогнозирования остаточного ресурса эксплуатируемых шаровых трубных мельниц дает возможность рассчитать величину остаточного ресурса этих объектов.

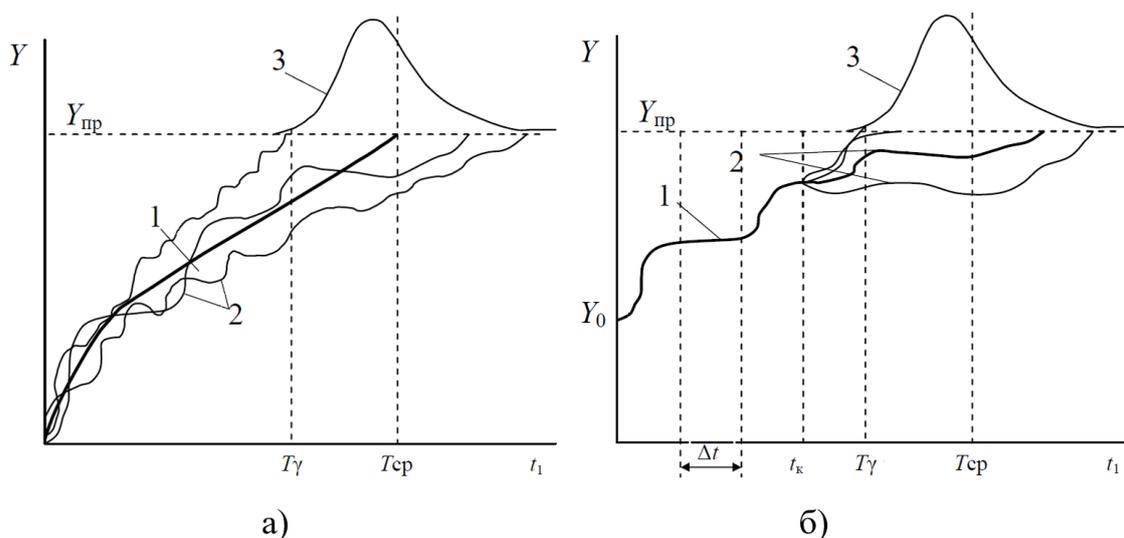


Рис. 2. Графические зависимости изменения параметров технического состояния эксплуатируемой технической системы при: а) постоянной дисперсии, б) непостоянной дисперсии:

- 1 – математическое ожидание (среднее значение) случайной величины, 2 – некоторые реализации, 3 – плотность распределения ресурса; T_{γ} – гарантированный ресурс, $T_{ср}$ – средний ресурс, $Y_{пр}$ – предельное значение параметра технического состояния эксплуатируемой технической системы

Определить причины изменения показателей долговечности технических систем и разработать комплекс мероприятий для снижения влияния негативных факторов на эти системы можно на основании приведенных методик определения остаточного ресурса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электропроводный бетон // Бетоны URL: <http://betony.ru/betel/> (дата обращения: 03.09.2024).
2. Справочник // Строительная техника URL: <https://stroy-technics.ru/> (дата обращения: 03.09.2024).
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34). С. 3–33.
4. Бестужева О.В. Прогнозирование остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы с учетом напряженно-деформированного состояния: специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2019. 170 с.
5. Климов Д.С. Токарный модуль для одновременной обработки внутренней и наружной поверхностей цапф, помольных мельниц // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 3311–3313.
6. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. 26 с.
7. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Аулов В.Г., Маркова О.В., Антонов С.И. Проблемы повышения эффективности и работоспособности вращающихся агрегатов непрерывного цикла // Технология машиностроения. 2014. № 11. С. 46–49.
8. Бондаренко Ю.А. Восстановление работоспособности крупногабаритных мельничных агрегатов приставными станками (монография) // Технологическое обеспечение качества и ресурса при изготовлении, сборке, ремонте и восстановлении. Коллективная монография. Под ред. А.В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 284 с.
9. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А., Санина Т.М. Энергосберегающие методы восстановления работоспособности оборудования промышленности строительных материалов (монография). Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 162 с.
10. Бондаренко Ю.А., Ханин С.И., Бестужева О.В. Математическое описание напряженно-деформированного состояния цапфы шаровой мельницы под действием силы тяжести и вращения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 3. С. 128–133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599
11. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации. 2021. 50 с.
12. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. 1990. 131 с.

13. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования. 2021. 4 с.

14. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса составных частей агрегатов и машин. 1986. 23 с.

15. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Схиртладзе А.Г., Санина Т.М. Бездемонтажное восстановление крупногабаритных агрегатов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 11. С. 11–14.

Информация об авторах

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: kds2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бестужева Ольга Васильевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий. Email: bestuzheva@bsu.edu.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Баранов Денис Сергеевич, ассистент кафедры технологии машиностроения. E-mail: den-3218@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Романович Алексей Алексеевич, профессор, доктор технических наук кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: Alexejrom@yandex.ru, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.08.2024 г.

© Бондаренко Ю.А., Бестужева О.В., Баранов Д.С., Романович А.А., 2024

^{1,*}*Bondarenko Yu.A.*, ²*Bestuzheva O.V.*, ¹*Baranov D.S.*, ¹*Romanovich A.A.*

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

²*Belgorod State National Research University*

**E-mail: kds2002@mail.ru*

PREDICTION OF THE RESIDUAL LIFE OF BALL TUBE MILLS

Abstract. An important stage of optimization and development of enterprises is to increase the reliability of equipment during operation. Frequent need for repair of grinding equipment in the building materials industry entails long downtimes. The main objectives of the optimization stage are: determining the main factors influencing the occurrence of malfunctions and establishing rational modes of equipment operation. To assess the operational potential of the equipment, the probability of failure-free operation, reducing the time of repair downtime and increasing the service life between repairs, it is necessary to predict the residual service life of the equipment based on the method of approximating the change in the parameters of its technical condition during operation. For this purpose, there is an algorithm for the functioning of the monitoring and control system for the technical condition of parts and assemblies of ball tube mills, which allows estimating the parameters with an error of 9%. Only when a given set of factors is fulfilled is it possible to predict the residual service life. Step-by-step collection of information on the dependence of direct and indirect parameters of the technical condition of the mill, a training experiment and alternative approaches are necessary for statistical processing of the obtained data, determining the parameters of the distribution function and estimating the confidence probability with a minimum sample size from the general population. When conducting periodic monitoring of the technical condition indicators of the journal of the support unit, it is necessary to take into account the errors of the measuring instruments, the method of performing the research, etc.

Keywords: ball tube mills, increasing reliability, optimizing equipment operating modes, predicting the remaining life of equipment

REFERENCES

1. Electrically conductive concrete. Concretes [Elektroprovodnyj beton. Betony] URL: <http://betony.ru/betel/> (date of access: 09/03/2024).
2. Handbook. Construction equipment

[Spravochnik. Stroitel'naya tekhnika] URL: <https://stroy-technics.ru/> (date of access: 09/03/2024).

3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SRC RF for the implementation of

«Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030». Aviation materials and technologies. [Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tekhnologij ih pererabotki na period do 2030 goda». Aviacionnye materialy i tekhnologii]. 2015. No. 1(34). Pp. 3–33. (rus)

4. Bestuzheva O.V. Forecasting the residual life of ball mill support journals taking into account the stress-strain state: specialty 05.02.13 «Machines, units and processes (by industry)»: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. [Prognozirovanie ostatochnogo resursa opornyh capf sharovoj mel'nicy s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya: special'nost' 05.02.13 «Mashiny, agregaty i processy (po otraslyam)»: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk]. 2019. 170 p. (rus)

5. Klimov D.S. Turning module for simultaneous processing of internal and external surfaces of journals, grinding mills. International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. [Tokarnyj modul' dlya odnovennoy obrabotki vnutrennej i naruzhnoj poverhnostej capf, pomol'nyh mel'nic. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V.G.] Belgorod, April 30 - 20, 2021. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 3311–3313. (rus)

6. GOST 27.003-2016. Industrial product dependability. Dependability requirements: contents and general rules for specifying. [Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovanij po nadezhnosti]. 26 p. (rus)

7. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Aulov V.G., Markova O.V., Antonov S.I. Problems of increasing the efficiency and performance of continuous cycle rotating units. Technology of Mechanical Engineering. [Problemy povysheniya effektivnosti i rabotosposobnosti vrashchayushchihsy agregatov nepreryvnogo cikla. Tekhnologiya mashinostroeniya.], 2014. No. 11. Pp. 46–49. (rus)

8. Bondarenko Yu.A. Restoration of operability of large-sized mill units with add-on machines (monograph). Technological provision of quality and resource during manufacturing, assembly, repair and restoration [Vosstanovlenie rabotosposobnosti krupnogabaritnyh mel'nichnyh agregatov

pristavnymi stankami (monografiya). Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva i resursa pri izgotovlenii, sborke, remonte i vosstanovlenii]. Collective monograph. Ed. A.V. Kirichek. M.: Publishing house «Spectrum», 2012. 284 p. (rus)

9. Bondarenko Yu.A., Fedorenko M.A., Sanina T.M. Energy-saving methods for restoring the operability of equipment in the building materials industry (monograph) [Energosberegayushchie metody vosstanovleniya rabotosposobnosti oborudovaniya promyshlennosti stroitel'nyh materialov]. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2011. 162 p. (rus)

10. Bondarenko Yu.A., Khanin S.I., Bestuzheva O.V. Mathematical description of the stress-strain state of a ball mill journal under the action of gravity and rotation. [Matematicheskoe opisanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya capfy sharovoj mel'nicy pod dejstviem sily tyazhesti i vrashcheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. Vol. 4 No. 3. Pp. 128–133. DOI: 10.34031/article_5ca1f6356f67c4.15287599 (rus)

11. RD 26.260.004-91. Forecasting the remaining life of equipment based on changes in the parameters of its technical condition during operation. [Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii]. 2021. 50 p. (rus)

12. RD 50-690-89. Methodical instructions. Reliability in engineering. [Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike]. 1990. 131 p. (rus)

13. GOST 27518-87. Diagnostics of products. General requirements. [Diagnostirovanie izdelij. Obshchie trebovaniya]. 2021. 4 p. (rus)

14. GOST 27.302-86. Reliability in engineering. Methods for determining the permissible deviation of the technical condition parameter and forecasting the residual life of components of units and machines. [«Nadezhnost' v tekhnike. Metody opredeleniya dopuskaemogo otkloneniya parametra tekhnicheskogo sostoyaniya i prognostirovanie ostatochnogo resursa sostavnyh chastej agregatov i mashin]. 1986. 23 p. (rus)

15. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A., Skhirtladze A.G., Sanina T.M. Non-dismantling restoration of large-sized units. Repair, restoration, modernization. [Bezdemontazhnoe vosstanovlenie krupnogabaritnyh agregatov. Remont, vosstanovlenie, modernizaciya]. 2009. No. 11. Pp. 11–14. (rus)

Information about the authors

Bondarenko, Yulia A. DSc, Professor. E-mail: kds2002@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova St., 46.

Bestuzheva, Olga V. PhD. E-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru. Belgorod State National Research University. Russia, 308015, Belgorod, Pobedy St., 85.

Baranov, Denis S. Assistant. E-mail: den-3218@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova, 46.

Romanovich, Alexey A. DSc, Professor. E-mail: Alexejrom@yandex.ru, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.08.2024

Для цитирования:

Бондаренко Ю.А., Бестужева О.В., Баранов Д.С., Романович А.А. Прогнозирование остаточного ресурса шаровых трубных мельниц // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 132–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141

For citation:

Bondarenko Yu.A., Bestuzheva O.V., Baranov D.S., Romanovich A.A. Prediction of the residual life of ball tube mills. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 11. Pp. 132–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141