

Научно-теоретический журнал
ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

3

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**

№ 3, 2024 год

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

Vol. 3. 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	17.03.2024
Выход в свет	25.03.2024

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 13,37. Уч.-изд. л. 14,38. Тираж 40 экз. Заказ № 47

© 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:	17.03.2024

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).

Благоевич Деян, PhD, проф. Высшей технической школы по профессиональному образованию в Нише (Республика Сербия, г. Ниш).
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).

Бурынов 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., декан архитектурно-строительного факультета, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, директор НИИ «Материаловедение» Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва (РФ, Республика Мордовия, г. Саранск).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 сопровитвления 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).

Vasily 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, Director of the Institute "Materials Science", National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russian Federation, Republic of Mordovia, Saransk).

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

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

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

- Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С.**
ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЯЧЕЙСТОГО БЕТОНА 8
- Валиев А.И., Старовойтова И.А., Сулейманов А.М.**
АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ГИБРИДНОМ КОМПОЗИТЕ.
СВЯЗЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗ С ПРОЧНОСТЬЮ 17
- Осипова Н.Н., Яковлев Д.С.**
РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ
КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГАЗОМ 27
- Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х.**
УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЗДАНИЯ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 38
- Дубино А.М.**
ВЛИЯНИЕ СПЕЦИФИКИ КОНТЕКСТА НА УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ
РЕСУРСАМИ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ 47
- Го Цзэюй**
ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КИТАЕ 56
- Петухова Н.М., Жоркина Д.Г.**
АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКИХ ПОСТРОЕК НАЧАЛА XX ВЕКА С ЗАМКНУТЫМИ
ДВОРОВЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ В Г. ТАМБОВЕ 66

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

- Борисов И.Н., Новоселов А.Г., Никитина М.А.**
ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КАРБОНАТНЫХ
ПОРОД ПРИ СИНТЕЗЕ КАЛЬЦИЕВО-АЛЮМОФЕРРИТОВОГО КЛИНКЕРА 76

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Слободянский М.Г.**
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ
ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА, НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ 90
- Пахомов Е.Г., Романович А.А., Романович М.А., Дядин М.О.**
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ СМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ 107

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

- Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S.**
STUDY OF THE MACROPOROUS STRUCTURE OF CELLULAR CONCRETE 8
- Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S.**
STUDY OF THE MACROPOROUS STRUCTURE OF CELLULAR CONCRETE 17
- Osipova N.N., Yakovlev D.S.**
DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL FRAMEWORKS FOR THE OPERATION
OF COMPOSITE CYLINDERS IN MUNICIPAL GAS SUPPLY TO CONSUMERS 27
- Suleymanova L.A., Adham A.H.**
BUILDING LIFE CYCLE MANAGEMENT AT THE OPERATION STAGE USING
ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELS AND MACHINE LEARNING 38
- Dubino A.M.**
THE INFLUENCE OF CONTEXT SPECIFICS ON WATER
RESOURCES MANAGEMENT IN LARGE CITIES 47
- Guo Zeyu**
PRINCIPLES OF FUNCTIONAL-PLANNING ORGANIZATION OF INCINERATION
POWER PLANTS IN CHINA 56
- Petukhova N.M., Zhorkina D.G.**
ANALYSIS OF HISTORICAL BUILDINGS OF THE BEGINNING OF
THE XX CENTURY WITH CLOSED YARD SPACES IN THE CITY OF TAMBOV 66

CHEMICAL TECHNOLOGY

- Borisov I.N., Novoselov A.G., Nikitina M.A.**
STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING VARIOUS CARBONATE ROCKS
IN THE SYNTHESIS OF CALCIUM-ALUMINOFERRITE CLINKER 76

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- Slobodianskii M.G.**
FAILURE PREDICTION OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS BY STRENGTH
CRITERIA, MADE OF GREY CAST IRON, ON THE BASIS OF MICROSTRUCTURAL
MODELLING OF STRESS STATE 90
- Pakhomov E.G., Romanovich A.A., Romanovich M.A., Yadin M.O.**
ENERGY-SAVING MIXING UNIT FOR THE PREPARATION
OF DRY BUILDING MIXES 107

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16

Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., *Рябчевский И.С.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: kloud09@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Аннотация. Метод анализа изображений поверхности разреза ячеистого бетона представляет собой инновационный способ получения детальных и достоверных данных о структуре материала на макроуровне. С использованием специализированных программных средств и алгоритмов обработки изображений можно автоматически выделять и анализировать различные компоненты структуры материала, что значительно упрощает процесс исследования и повышает его достоверность. Однако использование данных программных средств не позволяет получить достоверные данные о поверхностной пористости ячеистого бетона ввиду малой разницы градиентов пикселей при обработке изображений. В статье приводится разработанный авторами способ определения поверхностной пористости ячеистых бетонов. Особенностью данного метода является заполнение пор поверхности разреза измельченным аморфным углеродом, последующим получением изображения поверхности при помощи цифровой фотокамеры, а затем его обработкой и анализом. Применение аморфного углерода в качестве наполнителя пор обусловлено высокой дисперсностью его частиц, позволяющей наиболее качественно заполнить поры поверхности разреза ячеистого бетона в отличие от пигментных смесей на водной основе, поскольку поверхностное натяжение воды в растворе препятствует попаданию пигмента в мелкие поры. Результаты, полученные с использованием разработанного способа, показывают высокую сходимость с результатами, полученными при помощи традиционных методов анализа изображений пористой структуры. Таким образом, применение метода анализа изображений представляет собой перспективный подход к определению пористости ячеистых бетонов, обеспечивая высокую точность данных при минимальном воздействии на объект исследования.

Ключевые слова: макропористость, ячеистый бетон, метод анализа изображений, кластер изображения, аморфный углерод.

Введение. В современном строительстве одним из важнейших материалов являются ячеистые бетоны, обладающие уникальными свойствами, такими как низкая плотность, высокая теплоизоляция и прочность [1–4]. Однако для эффективного проектирования и использования ячеистых бетонов необходимо иметь подробное представление об их пористой структуре. Поры и каналы внутри бетонной матрицы играют ключевую роль в определении физических и механических характеристик материала, таких как прочность, тепло- и звукоизоляция.

Понимание пористой структуры ячеистых бетонов не только способствует разработке более эффективных строительных материалов, но также позволяет оптимизировать процессы производства и улучшить экологические характеристики бетонных конструкций.

Определение пористой структуры ячеистых бетонов может быть выполнено с использованием разнообразных методов и техник (рис. 1).

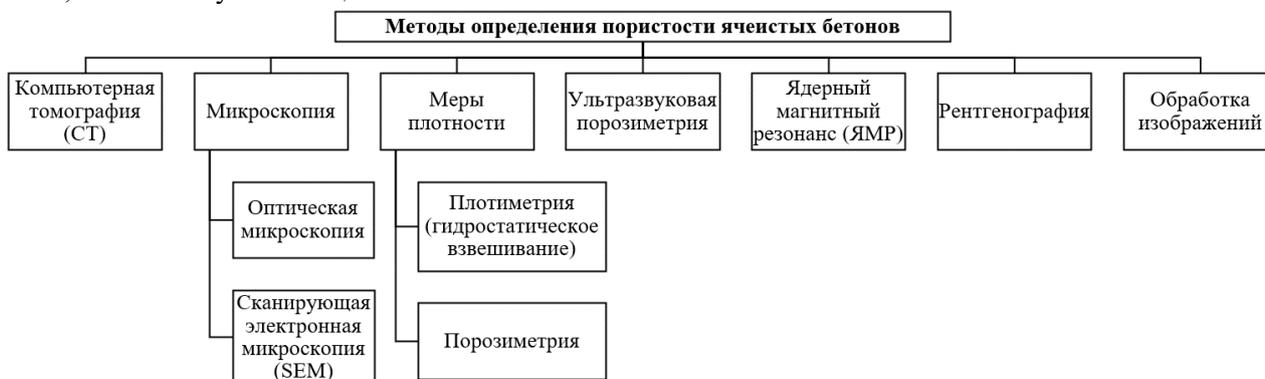


Рис. 1. Методы определения пористости ячеистых бетонов

Метод компьютерной томографии (СТ) основан на использовании рентгеновских лучей,

которые проходят через образец бетона. Данный метод позволяет не только оценивать общую

плотность различных областей объекта, через которые проходит рентгеновский луч (как в обычной рентгенографии), но и анализировать пространственное распределение этих плотностей. После прохождения через образец лучи попадают на детекторы, и информация об их поглощении используется для создания трехмерного изображения внутренней структуры материала [5].

СТ-сканирование обеспечивает высокую пространственную разрешающую способность, что позволяет видеть поры и каналы внутри бетона на микроуровне. Также данный метод не требует разрушения образца, что позволяет сохранить исследуемый материал для последующих исследований.

Однако СТ-сканирование включает в себя использование рентгеновских лучей, что может быть проблематично при исследовании больших образцов и требует соблюдения соответствующих мер безопасности. Метод может быть менее точным при анализе материалов с низкой разницей в плотности между порами и матрицей. При этом обработка данных СТ может потребовать специализированных программных средств и вычислительных ресурсов.

Микроскопия – это обширная группа методов, позволяющих исследовать пористую структуру материалов, включая ячеистые бетоны, на различных уровнях увеличения [6]. В зависимости от конкретной задачи и доступных средств могут использоваться разные виды микроскопии, такие как оптическая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия (SEM).

Оптический микроскоп использует видимый свет для освещения образца. Свет проходит через объективы и линзы, увеличивая изображение образца. Это позволяет исследовать структуру материала на макроскопическом уровне. Для анализа пористой структуры ячеистых бетонов, образец может быть подготовлен в виде тонких срезов, чтобы показать внутренние детали. Оптические микроскопы широко распространены и относительно доступны для большинства лабораторий.

SEM использует пучок электронов вместо света для освещения образца. Когда электроны взаимодействуют с образцом, они создают детальное изображение его поверхности. SEM позволяет получить высокоразрешающие изображения пористой структуры бетона на микроскопическом и даже наномасштабе [6].

Методы измерения плотности материалов, включая ячеистые бетоны, играют важную роль в определении пористой структуры. Существует несколько методов для измерения плотности материалов:

Плотиметрия (гидростатическое взвешивание). Данный метод основан на законе Архимеда, согласно которому любой предмет, погруженный в жидкость, вытесняет из жидкости объем, равный своему собственному объему. Для измерения плотности ячеистого бетона образец взвешивается в воздухе и затем в жидкости, обычно воде. Разница в весе позволяет вычислить объем образца, а плотность определяется как отношение массы к объему. Однако данный метод не позволяет различать различные компоненты внутри материала, такие как поры и матрица, а также не дает информацию о размерах и распределении пор.

Порозиметрия. Этот метод используется для определения размеров и распределения пор в материале. Существуют разные виды порозиметрии, но одним из наиболее распространенных методов является ртутная порозиметрия. В этом методе образец насыщается ртутью, и измеряется давление, которое ртуть оказывает на материал в зависимости от его пористой структуры. Это позволяет определить размеры пор и распределение пор в материале. При этом работа с ртутью требует соблюдения особых мер безопасности.

Ультразвуковые методы являются мощным инструментом для анализа пористой структуры материалов, включая ячеистые бетоны. Эти методы используют ультразвуковые волны для определения физических свойств материала и структуры пор [7, 8].

Ультразвуковые методы основаны на измерении времени, которое требуется ультразвуковым волнам для прохождения через материал и возврата обратно [9]. Ультразвуковые волны проникают в материал и могут быть отражены или рассеяны различными структурами и компонентами внутри материала, включая поры и каналы. Измеряя время задержки и амплитуду возвратных ультразвуковых волн, можно получить информацию о структуре и физических свойствах материала.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – это метод анализа пористой структуры материалов, который использует взаимодействие молекул с ядерными магнитными моментами (ядерными спинами) с магнитным полем и радиочастотным излучением [10]. ЯМР обычно применяется в химии и биологии, но также может быть использован для исследования материалов, включая ячеистые бетоны.

Принцип работы метода ЯМР: Ядра атомов (например, водорода, кислорода, углерода) обладают магнитными моментами, что означает, что они взаимодействуют с магнитным полем. В начальном состоянии ядра выстроены вдоль магнитного поля. Под действием радиочастотного

излучения (RF-импульса) ядра могут перейти в состояние, где их магнитные моменты поворачиваются вдоль новой оси, перпендикулярной магнитному полю.

После окончания воздействия RF-импульса ядра возвращаются к исходному состоянию. Процесс возврата сопровождается излучением радиочастотных сигналов, которые регистрируются и используются для создания спектра ЯМР. Спектр ЯМР предоставляет информацию о магнитных свойствах и взаимодействии ядер внутри материала. В частности, он может позволить исследовать взаимодействие молекул воды с порами и каналами бетона [10].

Однако широкое применение данного метода ограничено тем, что ЯМР требует специализированного оборудования, и данный метод лучше всего работает в материалах с высоким содержанием воды, что может ограничивать его применение в более сухих материалах.

Рентгенография – это метод исследования, который использует рентгеновские лучи для создания изображений внутренней структуры материалов и объектов. Этот метод может быть использован для анализа пористой структуры различных материалов, включая ячеистые бетоны [11].

В рентгенографии используются рентгеновские лучи, которые являются высокоэнергетическими фотонами. Лучи проходят через исследуемый материал и взаимодействуют с его атомами, что приводит к рассеянию и поглощению лучей. Как результат, на детекторе регистрируются интенсивность и распределение прошедших лучей.

Плотные материалы и компоненты материала будут более поглощать рентгеновские лучи, что создает различия в интенсивности лучей, отражаемых от разных частей материала. Измеряя интенсивность и угол рассеяния лучей, можно создать изображение внутренней структуры материала.

Рентгенография не разрушает образец и может использоваться для неконтактного изучения внутренней структуры материала. Также рентгенография обеспечивает высокое разрешение изображений, что позволяет видеть мелкие детали и поры в материале. Однако рентгеновские лучи являются формой ионизирующего излучения, поэтому при работе с ними необходимо соблюдать соответствующие меры безопасности. При этом рентгенография может показать различия в плотности материала, но не всегда позволяет различить разные компоненты внутри материала.

Метод анализа изображений начинается с оцифровки поверхности ячеистого бетона, при

которой цифровая фотокамера захватывает серию изображений поверхности. Эти снимки делаются при последовательном освещении ячеистого бетона световыми лучами, падающими под разными углами [12, 13]. Полученные изображения затем импортируются в специализированную программу для обработки. В этой программе происходит последовательное сравнение интенсивности красной, зеленой и синей составляющих каждого пикселя на серии изображений. Новое изображение формируется с учетом интенсивности каждого пикселя, приближенной к черному цвету.

Для получения цифровых изображений поверхности ячеистого бетона применяются красящие составы [14], включающие предварительную обработку поверхности материала следующим образом: сначала проводится шлифовка для достижения ровной однородной поверхности, затем поверхность подвергается продувке компрессором. Далее, поверхность равномерно покрывается пигментной смесью на основе черной водорастворимой гуаши, после чего происходит сушка, повторная шлифовка и повторная продувка. Оцифровка поверхности ячеистого бетона осуществляется с использованием бытового планшетного сканера, и затем определяются параметры пористости данного материала.

Эти методы являются менее трудоемкими, поскольку не требуют специализированного оборудования. Однако методы, использующие красящие составы, обладают значительным недостатком: поверхностное натяжение пигментной смеси, основанной на черной водорастворимой гуаши или других красящих составах, мешает проникновению пигмента в мелкие поры, что снижает точность определения параметров пористости ячеистого бетона.

Таким образом, целью исследования стала разработка и описание метода определения пористости ячеистых бетонов с использованием анализа изображений.

К задачам исследования можно отнести разработку метода предварительной обработки поверхности материала для достижения оптимальных условий анализа; определение параметров для заполнения пор лицевой поверхности материала с целью обеспечения качественного и точного анализа; разработку методики анализа цветных компонентов изображения для определения пористости с последующим анализом и интерпретацией полученных результатов.

Материалы и методы. В разработанном авторами методе определения поверхностной пористости ячеистых бетонов предлагается выполнить предварительную обработку поверхности

материала, включающую шлифовку для достижения ровной однородной поверхности и продувку компрессором [14, 15]. Для проведения исследования использовалось девять фрагментов

газобетонного блока марки по средней плотности $D500$ завода ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия) размером 15×15 мм каждый (рис. 2, а).

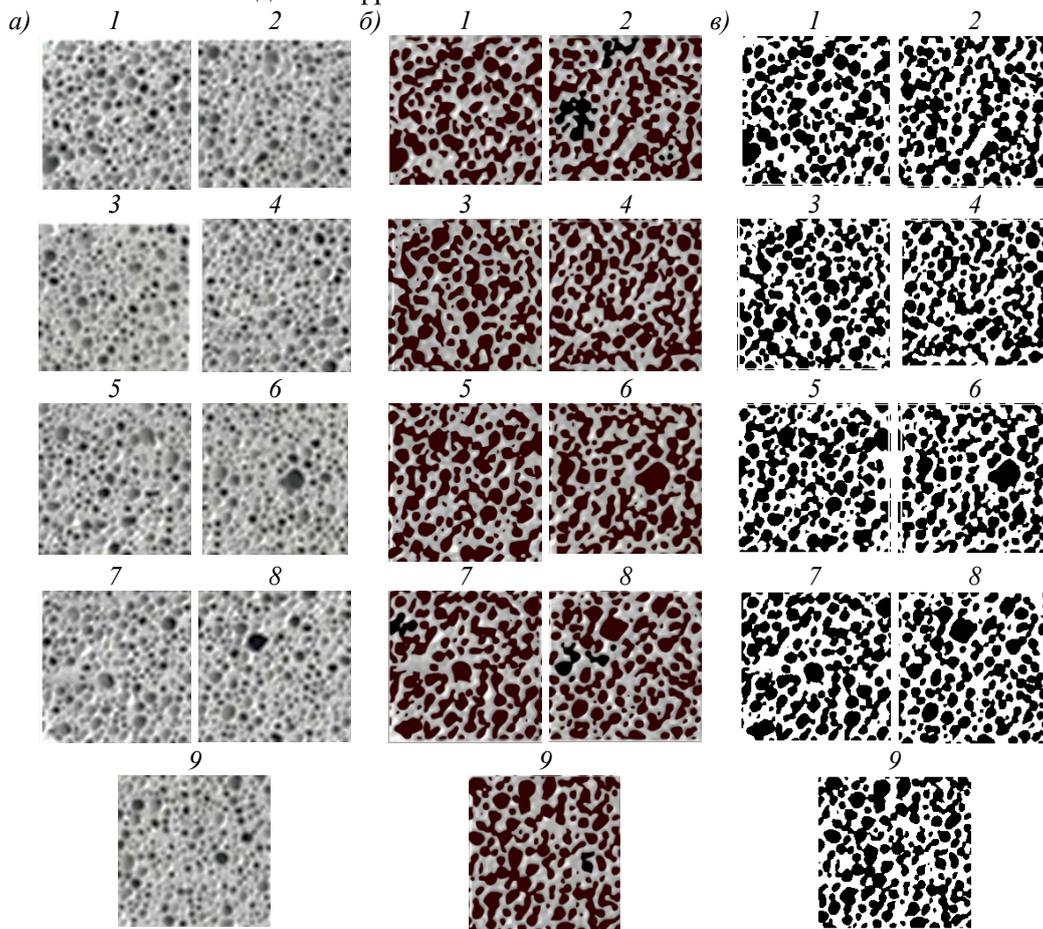


Рис. 2. Поверхность разреза образцов ячеистого бетона: а – натуральный вид; б – поверхность разреза с порами, заполненными аморфным углеродом; в – оцифрованный вид поверхности с пикселями, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету; 1–9 – номера образцов

Поры поверхности разреза материала после продувки заполняются измельченным аморфным углеродом, в данном случае измельченным древесным углем (рис. 2, б). Применение аморфного углерода в качестве наполнителя пор обусловлено высокой дисперсностью его частиц, позволяющей наиболее качественно заполнить поры поверхности разреза ячеистого бетона в отличие от пигментных смесей на водной основе, поскольку поверхностное натяжение воды в растворе препятствует попаданию пигмента в мелкие поры. При использовании пигментной смеси на основе черной водорастворимой гуаши после заполнения пор необходима сушка, повторная шлифовка и повторная продувка поверхности разреза. Данные этапы усложняют предварительную обработку поверхности материала, при этом повторная шлифовка может открыть поры, не заполненные пигментной смесью после первой шлифовки. При использовании измельченного аморфного углерода в качестве наполнителя пор

нет необходимости в сушке, повторной шлифовке и продувке поверхности.

Затем производится оцифровка поверхности с использованием цифровой фотокамеры при освещении поверхности ячеистого бетона световыми лучами, падающими под углом к поверхности с разных сторон [15].

Полученное цифровое изображение импортируется в графический редактор Just Color Picker для последовательного сравнения интенсивности каждой из трех цветовых компонент: красной, зеленой и синей, для каждого пикселя изображения [15]. Формируются пиксели поверхности газобетона, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету (рис. 2, в).

Для оценки корректности полученных результатов в рамках использования метода анализа изображений проведено исследование поверхностной пористости образцов ячеистого бетона без заполнения пор красящим составом с применением программы ImageJ, включающей в

себя все необходимые функции для цифровой обработки изображений [16]. Для обработки и анализа характеристик макропористой структуры поверхности газобетона в программе ImageJ использовался следующий алгоритм:

- преобразование изображения в 8-битное для повышения контрастности;
- устранение случайных шумов (появляющихся из-за дефектов поверхности и случайных связей пор) с помощью функции фильтра;
- сегментация изображения (выделение фона от важных макроразмерных структур) для нахождения порогового значения (порога) для полного определения объекта;
- анализ выбранных объектов.

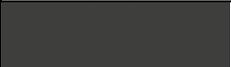
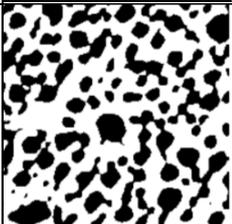
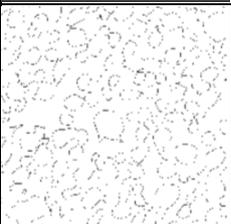
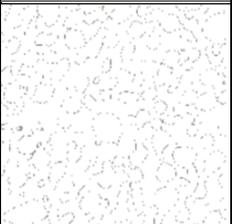
Программа ImageJ, применяемая для анализа изображений, использует метод обнаружения краев – это алгоритм, который используется для выделения границ объектов на изображении. Он основан на вычислении градиента изображения, который показывает изменение яркости в каждой

точке изображения. Однако при преобразовании изображения в 8-битное (256 цветов) для повышения контрастности из исходного 24-битного (полноцветное изображение) не все цвета могут быть представлены в 256-цветном пространстве, что ограничивает получение точных данных о пористой структуре материала.

Основная часть. Цифровое изображение поверхности разреза газобетона импортируется в специализированную программу, такую как Image Color Summarizer, которая позволяет определить процентное содержание пикселей для каждого значению цвета RGB на изображении. Пиксели группируются в кластеры на основе их цветового сходства – пиксели с похожими цветами с большей вероятностью будут сгруппированы вместе. Здесь сходство цветов основано не только на оттенке – оно учитывает все аспекты цвета: яркость, цветность и оттенок. Пиксели изображения, присвоенные каждому кластеру представлены в таблице 1.

Таблица 1

Разделы кластера изображений на примере образца 1

Код RGB	253, 253, 254	1, 2, 3	192, 192, 192	61, 61, 61	127, 127, 125
Кластер					
Раздел кластера					

Цвета на изображении были сгруппированы в 5 групп (табл. 1). Показан средний цвет цветов для каждого кластера.

Показатель поверхностной пористости газобетона определяется процентным содержанием пикселей сформированного цифрового изображения, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, то есть с интенсивностью каждого из трех цветовых компонентов: красного, зеленого и синего, от 0 до 200. К пикселям с RGB от 0 до 100 следует отнести пиксели пор, заполненных измельченным аморфным углеродом; от 100 до 200 – пиксели фактических границ пор, полученные при последовательном освещении поверхности ячеистого бетона, как пористого тела, световыми лучами; от 200 до 255 – пиксели межпоровых перегородок.

Для сравнения полученных данных в исследовании использовалась программа ImageJ.

Результаты анализа изображений представлены в таблице 2.

На основании результатов исследования, приведенных в таблице 2, можно сделать вывод о

высокой сходимости значений пористости, полученных при помощи разработанного авторами метода и с использованием программы ImageJ, при этом относительное допускаемое расхождение между результатами не превышает 1–2 %.

Таким образом, использование предложенного авторами метода определения пористости ячеистого бетона позволяет получить качественные и достоверные данные о пористости ячеистого бетона по цифровому изображению его поверхности разреза.

Вывод. Разработанный авторами метод определения пористости ячеистых бетонов, который включает в себя заполнение пор поверхности измельченным аморфным углеродом, последующее получение цифрового изображения при помощи цифровой фотокамеры и его анализ, представляет собой перспективный подход. Использование аморфного углерода в качестве заполнителя пор газобетона способствует снижению трудоемкости предварительной подготовки поверхности разреза без снижения качества получаемых изображений.

Метод анализа изображений поверхности разреза ячеистого бетона успешно демонстрирует свою эффективность в получении подробных данных о структуре материала на макроуровне. Значения пористости, полученные с помощью разработанного метода, сопоставимы с результатами, полученными программой ImageJ,

с относительным допускаемым расхождением не более 1–2 %. Такая высокая степень сходимости подтверждает эффективность и точность разработанного метода в определении поверхностной пористости ячеистого бетона по цифровому изображению его поверхности разреза.

Таблица 2

Результаты анализа цифровых изображений поверхности разреза газобетона

№ образца	Параметр кластера	Раздел кластера					Поверхностная пористость, %	
							полученная разработанным способом	полученная программой ImageJ
1	Код RGB	253,253,254	1,2,3	192,192,192	61,61,61	127,127,125	61,35	60,98
	Содержание пикселей, %	38,65	35,54	9,55	8,46	7,80		
2	Код RGB	248,248,247	8,8,8	192,192,192	128,128,128	66,66,66	63,16	63,27
	Содержание пикселей, %	36,84	27,76	13,96	11,40	10,04		
3	Код RGB	248,248,247	8,8,8	186,186,186	127,127,127	66,66,66	65,44	65,72
	Содержание пикселей, %	34,56	28,76	13,32	12,00	11,36		
4	Код RGB	246,247,247	8,8,8	189,189,189	66,66,66	125,125,125	65,20	65,65
	Содержание пикселей, %	34,80	29,72	12,52	11,80	11,16		
5	Код RGB	248,248,247	8,8,8	184,184,184	125,125,125	66,66,66	64,56	64,87
	Содержание пикселей, %	35,44	29,68	14,80	10,40	9,68		
6	Код RGB	246,247,247	8,8,8	184,184,184	64,64,64	124,123,122	63,96	63,02
	Содержание пикселей, %	36,04	29,43	13,59	10,65	10,29		
7	Код RGB	246,247,247	8,8,8	189,189,189	132,132,130	66,66,66	64,12	64,58
	Содержание пикселей, %	35,88	28,64	12,24	11,84	11,40		
8	Код RGB	246,247,247	8,8,8	189,189,189	128,128,128	69,69,69	65,96	64,94
	Содержание пикселей, %	34,04	28,20	12,72	12,60	12,44		
9	Код RGB	248,248,247	8,8,8	192,192,192	66,66,66	128,128,128	65,44	65,81
	Содержание пикселей, %	34,56	28,24	14,00	11,76	11,44		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Кондрашев К.Р., Сулейманов К.А., Пириев Ю.С. Энергосберегающие газобетоны на композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 4. С. 73–83.

2. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 69–76.

3. Сулейманова Л.А., Коломацкий А.С., Погорелова И.А., Марушко М.В. Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 34–42. DOI:10.12737/article_5a001aae2035d9.25914342

4. Сулейманова Л.А., Коломацкая С.А., Кара К.А. Энергоэффективный газобетон // В сборнике: Научные и инженерные проблемы строительной-технологической утилизации техногенных отходов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 218–220.

5. Осипов С.П., Прищепа И.А., Кудяков А.И. Компьютерная томография пенобетона // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 146–152. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

6. Вылегжанин В.П., Пинскер В.А., Петрова Т.М. Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность // Строительные материалы. 2021. № 8. С. 67–71. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71

7. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E., Karabutov A., Morozov D., Shibaev I. Laser-Ultrasonic Testing of the Structure and Properties of Concrete and Carbon Fiber-Reinforced Plastics // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 722. P. 267–272. DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.722.267
8. Kim B., Kim J. Characterization of ultrasonic properties of concrete // *Mechanics Research Communications*. 2009. Vol. 36. Pp. 207-214. DOI:10.1016/j.mechrescom.2008.07.003
9. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С. Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом // *Труды ВИАМ*. 2017. №7 (55). С. 102–109. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-11-11
10. Cherepetskaya E.B., Zalevskii Ia.O. Study of porosity of sedimentary rock samples by nuclear magnetic resonance and laser- ultrasound diagnostics // *МИАВ. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023. Vol. (8). Pp. 63–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_63
11. Sokhansefat G., Moradian M., Finnell M., Behravan A., Ley M., Lucero C., Weiss W. Using X-ray Computed Tomography to Investigate Mortar Subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 108. 103520. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103520.
12. Lange D.A., Jennings H.M., Shah S.P. Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials // *Cement and Concrete Research*. 1994. No 24(5). P. 841–853. DOI:10.1016/0008-8846(94)90004-3
13. Speranzini E., Marsili R., Moretti M., Rossi G. Image Analysis Technique for Material Behavior Evaluation in Civil Structures // *Materials*. 2017. Vol. 10. P. 1. DOI: 10.3390/ma10070770
14. Бедарев А.А. Возможности компьютерного анализа макроструктуры ячеистого бетона и его практическая реализация // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2010. № 2. С. 39–44.
15. Патент 2811671, Российская Федерация, МПК G01F 18/211. Способ определения пористости ячеистых бетонов / И.А. Погорелова, К.А. Сулейманов, В.С. Лесовик, И.С. Рябчевский.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2023115880; заявл. 16.06.2023; опубл. 15.01.2024, Бюл. № 2. 5 с.
16. Wang Z., Guo Y., Zhang P. A rapid quantitation of cell attachment and spreading based on digital image analysis: Application for cell affinity and compatibility assessment of synthetic polymers // *Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 128. 112267. DOI: 10.1016/j.msec.2021.112267

Информация об авторах

Сулейманов Карим Абдуллаевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: karimsuleymanov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Валерий Станиславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: naukavs@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Погорелова Инна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рябчевский Игорь Сергеевич, старший преподаватель кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kloud09@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.01.2024 г.

© Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С., 2024

Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., *Ryabchevskiy I.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: kloud09@mail.ru

STUDY OF THE MACROPOROUS STRUCTURE OF CELLULAR CONCRETE

Abstract. The method of image analysis of the front surface of cellular concrete is an innovative way to obtain detailed and reliable data on the structure of the material at the macro level. Using specialized software and image processing algorithms, various components of the material structure can be automatically isolated

and analyzed, which greatly simplifies the research process and increases its reliability. The article presents a method developed by the authors for determining the surface porosity of cellular concrete. A feature of this method is the filling of the pores of the front surface with crushed amorphous carbon, followed by obtaining an image of the front surface using a digital camera, and then its processing and analysis. The use of amorphous carbon as a pore filler is due to the high dispersion of its particles, which makes it possible to most efficiently fill the pores of the cut surface of cellular concrete, in contrast to water-based pigment mixtures, since the surface tension of water in the solution prevents the pigment from entering small pores. The results obtained using the developed method show high convergence with the results obtained using traditional methods for analyzing images of porous structures. Thus, the use of image analysis method represents a promising approach to determining the porosity of cellular concrete, providing high accuracy of data with minimal impact on the object of study.

Keywords: macroporosity, cellular concrete, image analysis method, image cluster, amorphous carbon.

REFERENCES

1. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kondrashev K.R., Suleymanov K.A., Piriev Yu.S. Energy-saving aerated concrete with composite binders [Energoberegayushchie gazobetonny na kompozitsionnyh vyazhushchih]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 73–83. (rus)
2. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)
3. Suleymanova L.A., Kolomatsky A.S., Pogorelova I.A., Marushko M.V. Increasing the efficiency of production and application of cellular concrete [Upravlenie processom formirovaniya poristoy struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of the BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 34–42. DOI: 10.12737/article_5a001aae2035d9.25914342. (rus)
4. Suleymanova L.A., Kolomatskaya S.A., Kara K.A. Energy-efficient aerated concrete [Povyshenie effektivnosti proizvodstva i primeneniya yacheistyh betonov]. In the collection: Scientific and engineering problems of construction and technological recycling of industrial waste. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova. 2014. Pp. 218–220. (rus)
5. Osipov S.P., Prishchepa I.A., Kudyakov A.I. Computed tomography of foam concrete [Komp'yuternaya tomografiya penobetona]. Systems. Methods. Technologies. 2018. No. 2(38). Pp. 146–152. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152. (rus)
6. Vylegzhanin V.P., Pinsker V.A., Petrova T.M. Microporosity of cellular concrete and its influence on thermal conductivity [Mikroporistost' yacheistogo betona i ee vliyanie na teploprovodnost']. Construction materials. 2021. No. 8. Pp. 67–71. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-794-8-67-71. (rus)
7. Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E., Karabutov A., Morozov D., Shibaev I. Laser-Ultrasonic Testing of the Structure and Properties of Concrete and Carbon Fiber-Reinforced Plastics. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 722. Pp. 267–272. DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.722.267
8. Kim B., Kim J. Characterization of ultrasonic properties of concrete // Mechanics Research Communications. 2009. No. 36. Pp. 207–214. DOI:10.1016/j.mechrescom.2008.07.003
9. Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dikov I.A., Generalov A.S. Assessment of the possibility of determining porosity in carbon fiber by the ultrasonic shadow method [Ocenka vozmozhnosti opredeleniya poristosti v ugleplastike ul'trazvukovym tenevym metodom]. Proceedings of VIAM. 2017. No. 7 (55). Pp. 102–109. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-11-11
10. Cherepetskaya E.B., Zalevskii Ia.O. Study of porosity of sedimentary rock samples by nuclear magnetic resonance and laser-ultrasound diagnostics. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. (8). Pp. 63–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_63
11. Bortolotto, T., Lura, P., Kaufmann, J. Combined use of X-ray micro-computed tomography and scanning electron microscopy for the investigation of frost damage in cementitious materials. Cement and Concrete Research. 2014. Vol. 65. Pp. 54–67.
12. Lange D.A., Jennings H.M., Shah S.P. Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials. Cement and Concrete Research. 1994. Vol. 24(5). Pp. 841–853. DOI:10.1016/0008-8846(94)90004-3
13. Speranzini E., Marsili R., Moretti M., Rossi G. Image Analysis Technique for Material Behavior Evaluation in Civil Structures. Materials. 2017. Vol. 10. 1. DOI: 10.3390/ma10070770
14. Bedarev A.A. Possibilities of computer analysis of the macrostructure of cellular concrete and its practical implementation [Vozmozhnosti komp'yuternogo analiza makrostruktury yacheistogo betona i ego prakticheskaya realizaciya]. Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2010. No. 2. Pp. 39–44. (rus)
15. Pogorelova I.A., Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Ryabchevsky I.S. Method for determining the porosity of cellular concrete. Patent RF, no 2811671, 2024. (rus)

16. Wang Z., Guo Y., Zhang P. A rapid quantitation of cell attachment and spreading based on digital image analysis: Application for cell affinity and

compatibility assessment of synthetic polymers. *Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 128. 112267. DOI: 10.1016/j.msec.2021.112267

Information about the authors

Suleymanov, Karim A. Postgraduate student. E-mail: karimsuleymanov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Valeriy S. DSc, Professor, Head of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures. E-mail: naukavs@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pogorelova, Inna A. PhD, Assistant professor of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: innapogorelova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryabchevskiy, Igor S. Postgraduate student. E-mail: kloud09@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 19.01.2024

Для цитирования:

Сулейманов К.А., Лесовик В.С., Погорелова И.А., Рябчевский И.С. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16

For citation:

Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. Study of the macroporous structure of cellular concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 3. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-8-16

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-17-26

^{1,*}Валиев А.И., ²Старовойтова И.А., ¹Сулейманов А.М.¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет²ООО «Научно-производственная фирма «Рекон»

*E-mail: tatcomposite@mail.ru

АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ГИБРИДНОМ КОМПОЗИТЕ. СВЯЗЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗ С ПРОЧНОСТЬЮ

Аннотация. Повышение жесткостных характеристик полимерных композитов обусловлено их полиармированием (содержащих в себе более одного вида армирующего непрерывного волокна) с обеспечением эффективной передачи напряжений от волокон к связующему через границу раздела фаз. Прочность адгезионного взаимодействия компонентов при этом может быть выражена через их энергетические характеристики. Исследование механизмов формирования адгезионного взаимодействия в полиармированном композите заключается в целенаправленном изменении энергетических характеристик фаз с целью достижения оптимального уровня адгезии, обеспечивающей высокую прочность композитов при обеспечении технологических и других факторов, прогнозирования их долговечности. В работе исследовалась связь энергетических характеристик контактирующих фаз с прочностью гибридного полимерного композита. Оптическим методом получены микрофотографии смачивания волокон различной природы жидкостями, по которым определены краевые углы смачивания, проведены испытания по определению предела прочности на изгиб полимерных композитов. Предложен и экспериментально подтвержден метод прогноза прочности на изгиб гибридных полимерных композитов, изготовленных методом вакуумной инфузии, заключающийся в связи адгезионного взаимодействия компонентов, структурных составляющих и прочности на изгиб путем определения изменения их энергетических характеристик наполнителя методом смачивания.

Ключевые слова: композит, замасливающая композиция, аппрет, адгезия, работа адгезии, свободная поверхностная энергия.

Введение. Согласно эссе Томаса Юнга о когезии жидкостей [1]: «Если притяжение частиц жидкости к твердому телу меньше, чем их притяжение друг к другу, наблюдается равновесие поверхностных сил, при котором поверхность жидкости образует с поверхностью твердого тела определенный угол. Одна из сил действует в направлении поверхности жидкости, вторая вдоль межфазной границы жидкости и твердого тела и третья вдоль поверхности твердого тела» и описывается формулой (1).

$$\sigma_s = \sigma_{sl} + \sigma_l \cos\theta \quad (1)$$

где σ_s – поверхностное натяжение твердой фазы;

σ_l – поверхностное натяжение жидкой фазы;

σ_{sl} – межфазное натяжение;

θ – краевой угол смачивания.

В полимерных композитах формирование контакта волокон и связующего является самопроизвольным процессом, сродство фаз в котором можно оценить по величине краевого угла смачивания. Ключевыми свойствами контактирующих фаз, позволяющих провести прогноз величины адгезии, являются их удельные поверхностные энергии γ . Для межфазных границ «жидкость-газ», «жидкость-жидкость» величина удельной свободной поверхностной энергии равна и эквивалентна по физическому смыслу

поверхностному натяжению жидкости (σ) или межфазному натяжению соответственно. Поверхностное натяжение жидкости, межфазное натяжение, может быть интерпретировано двояко: помимо работы по образованию единицы поверхности в изотермических условиях, его можно рассматривать как силу, действующую касательно к поверхности жидкости (на единицу длины контура) и стремящуюся уменьшить эту поверхность.

Естественно, предположить, что для полного использования потенциала прочности волокон в связующем необходимо выполнение условия по формуле (2).

$$W_k - W_a = 0 \quad (2)$$

где W_a – термодинамическая работа адгезии, затрачиваемой на преодоление сил межмолекулярного взаимодействия электростатической природы, определяемая по уравнению Юнга-Дюпре путем объединения уравнения Томаса Юнга по формуле (1) и уравнения Атанаса Дюпре по формуле $W_a = (\sigma_l + \sigma_s) - \sigma_{ls}$ [2] и равна $W_a = \sigma_l(1 + \cos\theta)$ [3].

W_k – работа когезии волокна. Работой когезии считается работа против сил молекулярного притяжения, затрачиваемая для обратимого изотермического разделения на две части столбика конденсированной фазы единичной площади се-

чения и непосредственно связана с свободной поверхностной энергией (γ), которая приводит к сцеплению молекул в конденсированных фазах и определяется по формуле (3) [4].

$$W_k = 2\gamma_s \quad (3)$$

где γ_s – свободная поверхностная энергия волокна.

В определениях работы адгезии (W_a) и работы когезии (W_k) заложена обратимость процесса разделения одной или двух разных фаз. Сближение двух твердых фаз не сопровождается их полным слиянием, что в общем случае требует поправок в уравнении (3). Работа когезии при этом связана с макроскопическими характеристиками твердых тел: теоретической прочностью, модулем упругости. Сопоставление величин W_a и W_k является ключевой задачей при прогнозировании прочностных характеристик и механизма разрушения полимерных композитов.

Условие (2) с учетом формул Юнга и Юнга-Дюпре можно преобразовать к виду:

$$1 + \cos\theta = 2k \frac{\gamma_s}{\gamma_l} \quad (4)$$

Важным компонентом этой формулы является коэффициент k , который характеризует степень приближения энергии взаимодействия на границе фаз (адгезия) к энергии когезии фазы, выбранной для сопоставления. Для полимерных композитов такой фазой сравнения является волокно. Отсюда, коэффициент k будет характеризовать степень приближения адгезионной энергии к энергии когезии волокна. При условии полного смачивания $\theta = 0^\circ$ коэффициент k численно равен соотношению поверхностных энергий жидкости (связующего) и твердого тела, т.е. показывает во сколько раз поверхностная энергия жидкости меньше поверхностной энергии твердого тела:

$$[k]_{\theta=0^\circ} = \gamma_l / \gamma_s \quad (5)$$

Известно большое количество способов регулирования краевого угла смачивания между волокном и связующим, заключающиеся в целенаправленном изменении их энергетических характеристик, которые включают в себя химическое, физико-химическое модифицирование поверхности армирующих волокон, связующего [5, 6]. Особое внимание при получении волокнистых материалов уделяется стадии замасливания, целью которой служит улучшение технологических свойств (соединение элементарных волокон в первичную нить, предотвращая слипание), защите от механических повреждений (истирания и разрушения в процессе изготовления волокон), в частности улучшению адгезии связующего к

волокну (за счет наличия на поверхности волокна различных функциональных групп). Замасливающая композиция (аппрет), как правило, представляет собой многокомпонентную систему из эмульгаторов, пленкообразующих и других компонентов, способствующих выравниванию и защите волокнистых материалов, улучшающих их смачиваемость [7]. Сведения о процессах замасливания волокон ограничены в виду того, что составы замасливающих композиций, условия их нанесения и последующей сушки волокон, как правило, являются предметом ноу хау [8].

В составах замасливающих композиций для неорганических волокон (стеклянных, базальтовых и др.) содержание пленкообразователей достигает 80–90 % (в пересчете на сухой остаток), а в аппретах для органических волокон (углеродных и др.) до 100 %. В качестве пленкообразователей и аппретов для обработки волокон различной природы чаще всего используются коллоидно-устойчивые, стабильные водные дисперсии органических смол (которые выбираются, исходя из близости по природе к связующим в волокнисто-армированных композитах) [9]. Преимуществами использования водных дисперсий органических смол в качестве пленкообразователей в составах замасливающих композиций является технологичность применения (хорошая совместимость с водой и другими компонентами, возможность регулирования основных характеристик – концентрации (сухого остатка), вязкости, pH, дисперсности, а также отсутствие или малое содержание органического растворителя [10–12].

Целью исследования является изучение связи энергетических характеристик фаз с прочностью гибридного полимерного композита.

Для достижения цели работы необходимо последовательно решить следующие задачи: 1) определить влияние вида пленкообразователя на свободную поверхностную энергию волокон и 2) установить зависимость прочности при изгибе композита и энергетических характеристик фаз.

Материалы и методы. Для определения изменения параметров свободной поверхностной энергии волокон различной природы с исследованием их смачивания использовались следующие материалы.

1. Волокнистые армирующие наполнители:

а) Однонаправленная углеродная ткань Fib Arm Tape 230 производства АО «Юматекс» (ТУ 1916-018-61664530-2013).

б) Однонаправленная стеклянная ткань (лента) Ortex 400 O 250 производства «БауТекс» (ТУ 13.20.46.000-006-52788109-2019).

2. Модифицированная эпоксидная смола для вакуумной инфузии «L».

3. Отвердитель «GL2» производства R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, Германия (соотношение «Смола «L»-отвердитель «GL2»-100:30, вязкость при 25°C – 248±100 мПа·с).

4. Пленкообразователи торговой линейки Veimix® ВЭП (на основе эпоксидных смол (от жидких до полутвердых)) производства ООО «НПФ «Рекон»:

а) Veimix® ВЭП-70P – водная дисперсия полутвёрдой эпоксидной смолы, содержит органический растворитель;

б) Veimix® ВЭП-74/L водная эмульсия жидкой модифицированной эпоксидной смолы «L»;

в) ВЭС – водная дисперсия винилэфирной смолы.

Основные характеристики плёнкообразователей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики плёнкообразователей

Продукт	Основные характеристики			
	Массовая доля нелетучих, %	Эпоксидная эквивалентная масса (ЕЕW), г/экв	Вязкость при 25°C, мПа·сек	pH
Veimix® ВЭП-70P	65,8	230–270	20000–25000	6,5
Veimix® ВЭП-74/L	72,0	180–225	10000–12000	6,4
ВЭС	50,8	Не применимо	350–500	4,2

Прокаливание волокон с целью удаления исходной замазливашей композиции (аппрета) производилось в муфельной печи, предварительно разогретой до температуры +(400±5) °C для углеродного волокна, +(560±5) °C для стеклянного волокна согласно результатам оценки термических характеристик тканей.

Пропитка стеклянных и углеродных волокон осуществлялась растворами плёнкообразователей с концентрацией ~2-5 % следующим образом: ткань погружалась в свежеприготовленные растворы плёнкообразователей, выдерживалась в течении 15-20 секунд с последующей ступенчатой сушкой сначала при комнатной температуре +(20±2) °C, затем в печи при +(60±2) °C в течении 1 часа и +(120±2) °C также в течении 1 часа.

Оптическим методом с горизонтальным расположением упрощенного стереоскопического микроскопа МПСУ-1 (при увеличении оптической головки в 4,8^x) путем присоединения адаптера AmScope SLR/DSLR (с увеличением 2) совместимым с зеркальным фотоаппаратом Nikon D3100 (14,2 мегапикселей), общая кратность увеличения составила 9,6, получены микрофотографии смачивания стеклянных, углеродных и базальтовых элементарных волокон для различных тестовых жидкостей с известными параметрами свободной поверхностной энергии:

а) дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144-2018;

б) анилин по ГОСТ 5819-78;

в) этиленгликоль по ГОСТ 10164-75.

Краевой угол смачивания определялся по видео и микрофотографиям мениска, зафиксированного при перемещении элементарного волокна, с использованием графической среды

«AutoCad», путем проведения касательной. Температура воздуха при испытании составила +(20±2) °C, влажность воздуха ~ 55 %.

Используя теорию Ванн Осса-Чедери-Гуда с использованием пространственного метода определены значения свободной поверхностной энергии волокон различной природы. Вычисление коэффициентов, построение аппроксимированных плоскостей производилось автоматически в программе «STATISTICA».

По ГОСТ Р 56805-2015 проведены испытания на трехточечный изгиб. С этой целью изготавливались полимерные композитные пластины, в том числе гибридные методом вакуумной инфузии с использованием мобильной установки для инфузии МВС-20-01 (с цифровым вакуумметром, поддерживающим заданное давление). Ширина образца составила 13 мм, пролет 140 мм, толщина пластин за счет предварительной обработки и герметизации вакуумным мешком (разницы давлений) имело незначительную разнотолщинность в пределах нормы и составила для углепластиков в среднем 2,9 мм, для гибридов 2,7 мм, размеры образцов на межслоевой сдвиг определены по формулам ГОСТ 32659-2014. Постотверждение изделий выполнялось при температуре 40°C в течении 15 часов в климатической камере ПКА, резка на станке ЧПУ с целью подготовки образцов, конденсации по ГОСТ 12423 и ГОСТ 56762.

Рассмотрены следующие варианты полимерных композитных пластин:

1. Пластина из углепластика из 10 слоев углеродной ткани с различной обработкой поверхности;

2. Гибридная пластина из угле-стеклопластика с толщиной углепластика по 1 слою (всего

2 слоя углеродной ткани с различной поверхностной обработкой, 8 слоев исходной стеклянной ткани), симметрично относительно нейтральной оси.

Основная часть. Нанос пленкообразователей на волокнах после удаления исходных замас-

ливающих композиций с поверхности стеклянного волокна (при $+(560\pm 5)$ °С), аппарата с поверхности углеродного волокна (при $+(400\pm 5)$ °С) составил в пределах от 1,0 % до 1,8 %. Результаты потери масс, определения наноса аппарата на примере углеродных тканей представлено в табл. 2.

Таблица 2

Результаты потери масс, определения наноса аппарата на примере углеродных тканей

Исходная масса тканей, %	Остаточная масса тканей после отжига (при (400 ± 10) °С, 20 минут), %	Остаточная масса тканей после выдержки отожженных тканей в растворах пленкообразователей в течении 15–20 секунд, с последующей сушкой при $+(20\pm 2)$ °С, 20 часов, %		Остаточная масса ступенчатой сушки после 20 часов при $+(60\pm 2)$ °С, 1 час и при $+(120\pm 2)$ °С, 1 час, %	Остаточная масса после повторного отжига тканей с нанесенными пленкообразователями, %
		ВЭС	ВЭП-70Р		
100	98 (-2)	ВЭС	99,4 (+1,4)	99,2 (-0,2)	98,2 (-1%)
		ВЭП-70Р	99,8 (+1,8)	99,7 (-0,1)	97,9 (-1,8%)
		ВЭП-74/L	99,7 (+1,7)	99,3 (-0,4)	97,9 (-1,4)

Оптическим методом проанализированы картины смачивания стеклянных и углеродных элементарных волокон с нанесенными пленкообразователями (табл. 3) тестовыми жидкостями с известными параметрами свободной поверхностной энергии с последующим определением по

теории Ванн Осса-Чедери-Гуда параметров свободной поверхностной энергии элементарных волокон (табл. 4). Погрешность измерений до 10–15% (например, для угла $\sim 10^\circ$ погрешность $\pm 1^\circ$, для углов $\sim 20-25^\circ \pm (2\div 3)^\circ$).

Таблица 3

Краевые углы смачивания волокон тестовыми жидкостями

Поверхность	Краевой угол смачивания, θ , °		
	ВЭС	Veimix® ВЭП-70Р	Veimix® ВЭП-74/L
Стеклянное моноволокно	Дистиллированная вода		
	16±1	15±1	13±1
	Этиленгликоль		
	25±3	18±2	17±2
	Анилин		
	16±1	16±1	19±2
Углеродное моноволокно	Дистиллированная вода		
	15±1	11±1	22±3
	Этиленгликоль		
	12±1	13±1	14±1
	Анилин		
	25±3	19±2	16±1

Таблица 4

Свободная поверхностная энергия и ее составляющие для различных волокон

Поверхность	γ_s , мДж/м ²	γ_s^d	$\gamma_s^{ab} = 2\sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-}$	γ_s^+	γ_s^-	
Стеклянное моноволокно	исходная	38,31	5,6	32,71	116,5	2,3
	после отжига	32,45	5,17	27,28	133,68	1,39
	ВЭС	13,02	3,39	9,63	161,65	3,39
	Veimix® ВЭП-70Р	26,47	4,52	21,95	140,43	0,86
	Veimix® ВЭП-74/L	29,51	4,36	25,15	139,01	1,14
Углеродное моноволокно	исходная	18,72	4,31	14,41	147,94	0,35
	после отжига	14,54	2,19	12,35	169,92	0,22
	ВЭС	41,69	5,1	36,59	118,0	2,84
	Veimix® ВЭП-70Р	33,77	4,68	29,09	133,72	1,58
	Veimix® ВЭП-74/L	35,15	6,44	28,71	113,84	1,81

По результатам определения свободной поверхностной энергии волокон различной природы после отжига, модифицирования различными составами пленкообразователей наблюдается для элементарных стеклянных волокон снижение свободной поверхностной энергии после отжига на 15,3 %, с ВЭС на 66 %, с ВЭП-70Р на 30,9 %, с ВЭП-74/Л на 23%; для элементарных углеродных волокон снижение свободной поверхностной энергии после отжига на 22,3 %, увеличение на 55,1 % с ВЭС, на 44,5 % с ВЭП-70Р, на 46,7 % с ВЭП-74/Л относительно исходных волокон; уменьшение дисперсионной составляющей (γ_s^d) на 34,4 % с ВЭС, 12,6 % с ВЭП-70Р, 15,7 % с ВЭП-74/Л для стеклянных волокон и увеличение на 57,1 % с ВЭС, 53,2 % с ВЭП-70Р, 66 % с ВЭП-74/Л для углеродных волокон относительно отожженных; уменьшение полярной составляющей (γ_s^{ab}) на 64,7 % с ВЭС, 19,5 % с ВЭП-70Р, 7,8 % с ВЭП-74/Л для стеклянных волокон и увеличение на 66,2 % с ВЭС, 57,5 % с ВЭП-70Р, 57 % с ВЭП-74/Л для углеродных волокон относи-

тельно отожженных; увеличение электроноакцепторных (кислотных) взаимодействий (γ_s^+) на 17,3 % с ВЭС, 4,8 % с ВЭП-70Р, 3,8 % с ВЭП-74/Л для стеклянных и уменьшение на 30,6 % с ВЭС, 21,3 % с ВЭП-70Р, 33 % с ВЭП-74/Л для углеродных волокон относительно отожженных; увеличение электронодонорных (основных) взаимодействий (γ_s^-) на 59% с ВЭС, уменьшение на 38,1 % с ВЭП-70Р, 18% с ВЭП-74/Л для стеклянных волокон и увеличение на 92,3 % с ВЭС, 86,1 % с ВЭП-70Р, 87,8 % с ВЭП-74/Л для углеродных волокон относительно отожженных.

В табл. 5 приведены результаты смачивания элементарных волокон различной природы с эпоксидной смолой «L» и системой «L» + отвердитель «GL2», определены коэффициенты k для вычисленных значений γ_s (табл. 4) по формуле (4), работы адгезии ($W_a = \sigma_l(1 + \cos\theta)$, мДж/м²) при известных значениях поверхностного натяжения эпоксидной смолы «L» ($\sigma_l = 44,54$ мН/м), связующего «L+GL2» ($\sigma_l = 37,36$ мН/м).

Таблица 5

Краевые углы смачивания волокон со связующим, коэффициенты k , работы адгезии

Поверхность		Краевой угол смачивания, θ , °		k_L	k_{L+GL2}	$W_{a(L)}$	$W_{a(L+GL2)}$
		L	L+GL2				
Стекло- волоконное	исходная	9±1	4±1	1,16	0,97	88,53	74,63
	после отжига	10±1	5±1	1,36	1,15	88,40	74,58
	ВЭС	12±1	6±1	3,38	2,86	88,11	74,52
	Veimix® ВЭП-70Р	11±1	6±1	1,67	1,41	88,26	74,52
	Veimix® ВЭП-74/Л	11±1	5±1	1,50	1,26	88,26	74,58
Углеродное волоконное	исходная	16±2	3±1	2,33	1,99	87,35	74,67
	после отжига	19±3	4±1	2,98	2,57	86,65	74,63
	ВЭС	13±1	4±1	1,05	0,90	87,94	74,63
	Veimix® ВЭП-70Р	14±1	4±1	1,30	1,10	87,76	74,63
	Veimix® ВЭП-74/Л	12±1	3±1	1,25	1,06	88,11	74,67

За счет окисления поверхности углеродных волокон в атмосфере воздуха изменяется число их парамагнитных центров. Парамагнитные центры характеризуют количество активных атомов углерода с некомпенсированной валентностью в виде неспаренных электронов, которые стабилизируются системой полисопряжения. Увеличение количества активных атомов связано с деструкцией наиболее неустойчивых участков поверхности (пропорционально удельной поверхности углеродного волокна).

Окисление с последующим замасливанием поверхности углеродных волокон приводит к:

- увеличению числа парамагнитных центров, удельной поверхности;
- увеличению количества реакционноспособных функциональных групп, которые повышают полярность поверхности, способность к

химическому взаимодействию с реакционноспособными функциональными группами матрицы.

За счет отрицательного влияния пиролиза на прочность стеклянных волокон (снижение прочности на ~98,5%) и понижения их свободной поверхностной энергии после модифицирования различными составами пленкообразователей, удовлетворительном значении коэффициента k (1,16 с эпоксидной смолой «L», 0,97 для связующего «L+GL2»), было принято решение изготовить углепластики, гибридные полимерные композиты на основе сочетания стеклянных волокон с исходными замасливающими композициями, отожженных углеродных волокон, обработанных составами пленкообразователей на основе винилэфирной смолы (ВЭС), модифицированной эпоксидной смолой «L» (ВЭП-74). Результаты испытаний прочности полимерных композитов на изгиб приведены на рис. 1.

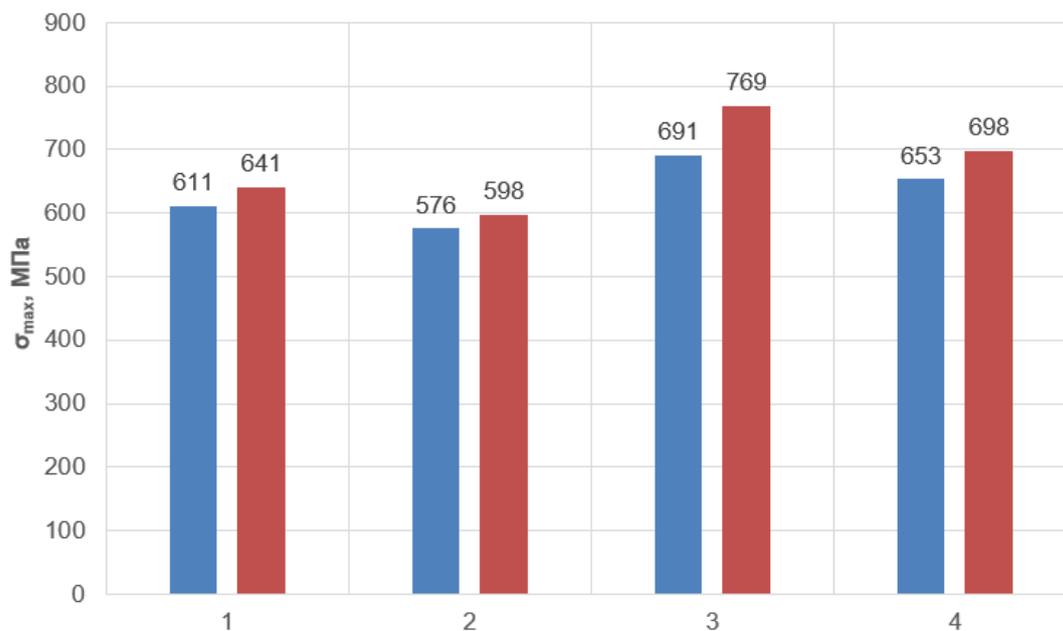
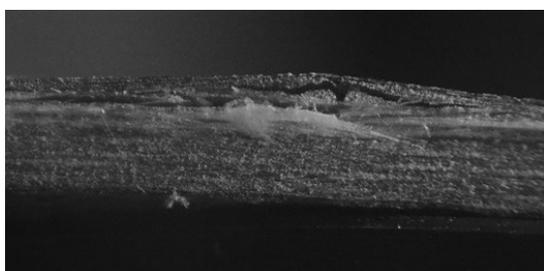


Рис. 1. Результаты определения предела прочности на трехточечный изгиб углепластиков (синяя), гибридных композитов на основе исходной стеклянной ткани (красная), углеродных тканей с : 1 – исходным аппретом; 2 – удаленным аппретом; удалением аппрета и модифицированием; 3 – ВЭС; 4 – ВЭП-74/Л

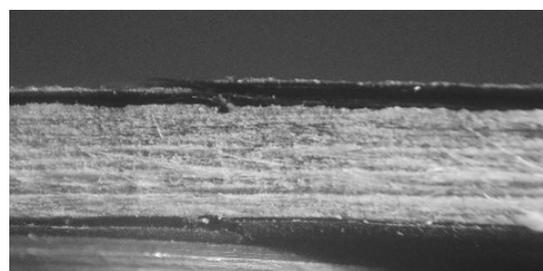
По результатам испытаний на изгиб наблюдается изменение прочности: для углепластиков с отожженным наполнителем снижение на 5,6 %, с ВЭС увеличение на 11,7 %, с ВЭП-74/Л увеличение на 6,5 % относительно композита с волокнами на основе исходного аппрета; для гибридных композитов после отжига наполнителя на 6,7 %, с ВЭС увеличение на 16,7 %, с ВЭП-74/Л на 8,2 % относительно композита с волокнами на основе исходных аппретов. По ранее проведенным исследованиям предел прочности на изгиб стеклопластиков на основе исходных замасливающих композиций составила $\sigma_{max} = 815$ МПа, при этом небольшое по содержанию углеродное волокно симметрично относительно срединной плоскости в составе полимерного композита увеличивает модуль упругости на ~40 % [13]. Фото

разрушения гибридных композитов представлено на рис. 2. Разрушение гибридных полимерных композитов с наполнителями на основе волокон различной природы с исходными замасливающими композициями (аппретами) произошло как в зоне углепластика, так и с последующим разрушением стеклопластика, для гибридного полимерного композита на основе сочетания стеклянных волокон с исходными замасливающими композициями и отожженных углеродных волокон, обработанных составами пленкообразователей только в зоне углепластика.

Связь коэффициента k для эпоксидной смолы «L», связующего «L+GL2» и прочностью углепластика на изгиб представлено на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Фото разрушения гибридных композитов при трехточечной схеме нагружения: а) на основе волокон с исходными замасливающими композициями (аппретами) б) на основе исходной замасливающей композицией стеклянных волокон и модифицированных углеродных волокон составами пленкообразователей (продольное направление съемки)

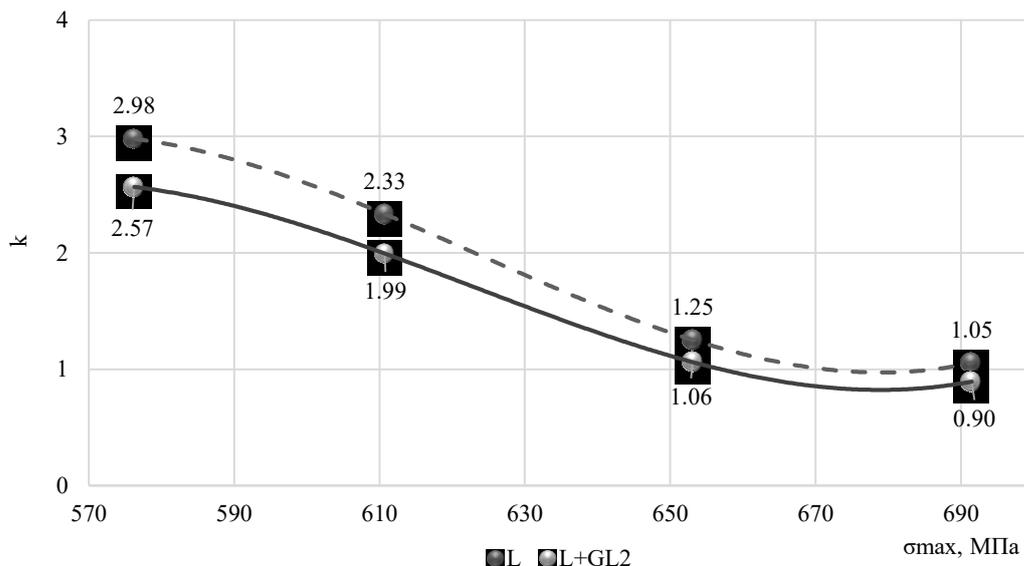


Рис. 3. Связь коэффициента k с прочностью углепластика на изгиб

По результатам можно заключить, что коэффициент k имеет хорошую корреляцию с пределом прочности при изгибе углепластика.

Связь коэффициента k (из условия $k = \frac{k^c + k^y}{2}$, k^c, k^y – для стеклянного и углеродного волокна соответственно) для эпоксидной смолы

«L», для связующего «L+GL2» и прочностью гибридного полимерного композита на изгиб представлено на рис. 4.

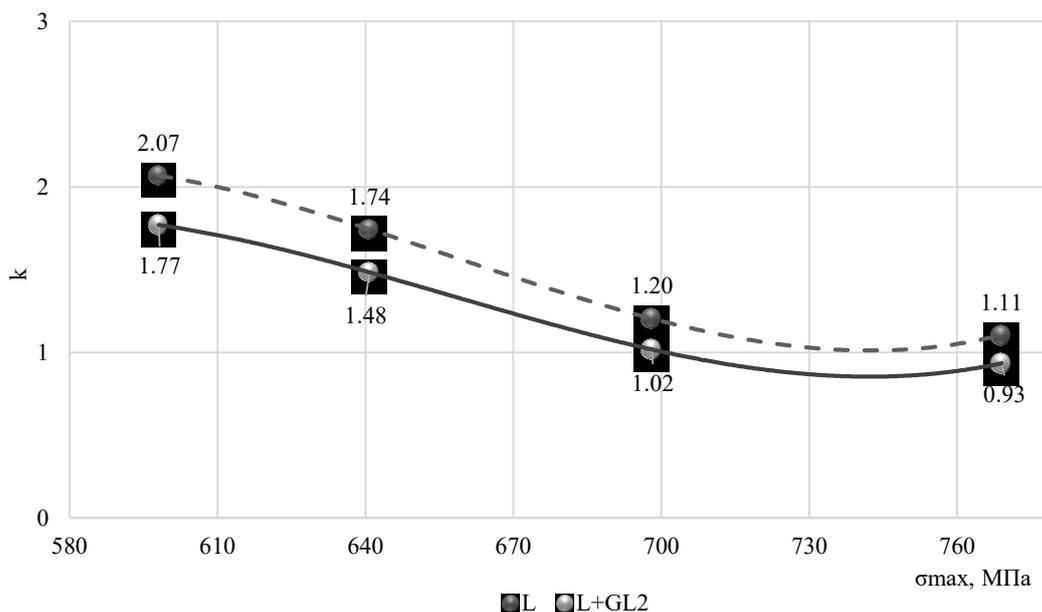


Рис. 4. Связь коэффициента k с прочностью гибридного полимерного композита на изгиб

Из представленных графиков можно сделать вывод, что при достижении коэффициента $k \sim 1$ возможно достижение полного использования потенциала прочности волокон различной природы в связующем с максимальной прочностью полимерного композита при изгибе.

Сила адгезионного взаимодействия между волокнами и матрицей в общем случае определяется множеством факторов:

- механической связью, которая заключается в увеличении шероховатости поверхности наполнителя в субмикронном диапазоне;
- химической связью, которая предполагает наличие на поверхности волокон и полимерной/олигомерной цепи связующего функциональных гидроксильных и эпоксидных (для матрицы) групп.

Прогнозирование адгезионного взаимодействия фаз в композиционных материалах в целях достижения оптимума могут также выполняться на основе моделирования с использованием различных методик, которые ускоряют разработку конструкционных материалов [14]. Статистический анализ показал, что машинное обучение позволяет анализировать большое количество информации, изучать, выявлять закономерности и корреляции данных между входными и выходными данными путем оптимизации выбранной модели обучения [15–17].

Выводы

В работе представлены результаты связи энергетических характеристик фаз и прочности при изгибе полимерных композитов:

1. Предложен и экспериментально подтвержден метод прогноза прочности на изгиб гибридных полимерных композитов, изготовленных методом вакуумной инфузии, заключающийся в связи адгезионного взаимодействия компонентов, структурных составляющих и прочности на изгиб путем определения изменения их энергетических характеристик методом смачивания. Увеличение свободной поверхностной энергии углеродных волокон коррелирует с прочностью на изгиб углепластиков, гибридных композитов (стеклянная ткань с исходной замасливающей композицией) с модифицированными отожженными углеродными волокнами составами различных пленкообразователей, получено увеличение прочности композитов на 6–17 %;

2. Наблюдается увеличение свободной поверхностной энергии при модифицировании исходных углеродных волокон различными составами пленкообразователей на 47–55 %, при этом улучшается смачивание волокон со связующим, что связано с увеличением удельной поверхности углеродных волокон при повышении ее полярности за счет увеличения количества реакционноспособных функциональных групп. Для исходных стеклянных волокон с большой потерей прочности, модифицированных различными составами пленкообразователей, наблюдается понижение свободной поверхностной энергии на 23–66 %, что, предполагаем, обусловлено использованием в исходных замасливающих композициях помимо пленкообразователя других компонентов, способствующих появлению на поверхности стекловолокна различных функциональных групп и химической прививке пленкообразователя к поверхности стекла при участии некоторых добавок, в частности аminosиланов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. An Essay on the Cohesion of Fluids – by Thomas Yong 1805 Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp.65–87.
2. Theorie mecanique de la chaleur. by Athanase M. Dupre, Paul Dupre. Publication date 1869. Publisher Gauthier-Villars. 517 p.
3. Старостина, И. А., Стоянов О.В., Краус Э. Развитие методов оценки поверхностных кислотно-основных свойств полимерных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 4. С. 58–68.
4. Karzov I.M., Alentiev A. Yu., Bogdanova Yu.G., Kostiina Yu.V., Shapagin A.V. The influence of «fiber-matrix interface energetic characteristics on the polymer composite strength // Moscow University Chemistry Bulletin. 2010. Vol. 51. № 6. Pp. 462–470.
5. Tiwari S., Bijwe J. Surface treatment of carbon fibers – a review // Procedia Technology. 2014. Vol. 14. Pp. 505–512.
6. Mahltig B., Kyosev Y. Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications. Woodhead Publishing, 2018. 343 p.
7. Валуева М.И., Зеленина И.В., Хасков М.А., Гуляев А.И. Подготовка волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей. Труды ВИАМ. №10 (58). 2017. С. 79–89.
8. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ. 2016. №12 (46). С. 65–73. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.
9. Пат. 2699100 Российской Федерации, МПК C09D 163/00, C09D 5/02, C08L 63/00, C08J 3/03. Способ получения водной эпоксидной дисперсии / Семенов А.Н., Старовойтова И.А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «НПФ «Рекон». Заявка № 2019109528, 01.04.2019, опублик. 03.09.2019. Бюл. №25. 9 с.
10. Thomason, J., Nagel U., Yang L., Bryce D. A study of the thermal degradation of glass fibre sizings at composite processing temperatures // In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 30 Jun 2019. Vol.121. Pp. 56–63. DOI:10.1016/j.compositesa.2019.03.013.
11. Thomason, J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings // Polymer Testing. February 2020. Vol. 85. Pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2020.106421.
12. Bryce D., Liu Y., Thomason J. An investigation of fibre sizing on the interfacial strength of glass-fibre epoxy composites // Contribution to conference - Mechanical And Aerospace Engineering. 24 June 2018. Pp. 1–8.

13. Валиев А.И., Шакирзянов Ф.Р., Сулейманов А.М., Низамов Р.К. Оценка напряженно-деформированного состояния гибридных полимерных композитов, изготовленных методом вакуумной инфузии // Известия КГАСУ. 2023. №4(66). С. 241–25. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_241, EDN: QQUTHA

14. Chen C., Gu G. Machine learning for composite materials // MRS Communications. 2019. № 9. Pp. 1–11. DOI: 10.1557/mrc.2019.32.

15. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Akkerman R., Hattel J. A Review on the Mechanical Modeling of

Composite Manufacturing Processes // Arch Computation Methods Eng. 2016. № 24. Pp. 365–395. DOI: 10.1007/s11831-016-9167-2.

16. Ramprasad R., Batra R., Pilia G., Manodi-Kanakkithodi A., Kim C. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects // NPJ Computational Materials. 2017. Pp. 1–27. № 3. DOI:10.1038/s41524-017-0056-5.

17. Yang C., Kim Y., Ryu S., Gu G. Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks // Materials & Design. 2020. Pp. 1–9. № 189. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108509.

Информация об авторах

Валиев Алмаз Илсурович, аспирант кафедры строительных материалов. E-mail: tatcomposite@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Старовойтова Ирина Анатольевна, кандидат технических наук. E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru. ООО «НПФ «Рекоп». Россия, 420095, Казань, ул. Васильченко, д. 7Б.

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов. E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Поступила 03.03.2024 г.

© Валиев А.И., Старовойтова И.А., Сулейманов А.М., 2024

^{1,*}Valiev A.I., ²Starovoitova I.A., ¹Suleimanov A.M.
¹Kazan State University of Architecture and Civil Engineering
²LCC «Rekon»
 *E-mail: tatcomposite@mail.ru

ADHESION INTERACTION IN HYBRID COMPOSITE. RELATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF PHASES WITH STRENGTH

Abstract. The increase of stiffness characteristics of polymer composites is caused by their polyarming (containing more than one type of reinforcing continuous fiber) with the provision of effective stress transfer from fibers to binder through the interface. The strength of adhesive interaction of components can be expressed through their energy characteristics. The study of mechanisms of formation of adhesive interaction in polyarmy composite consists in purposeful change of energy characteristics of phases with the purpose of achievement of optimum level of adhesion providing high strength of composites at maintenance of technological and other factors, forecasting of their durability. In this work, the relationship between the energy characteristics of the contacting phases and the strength of the hybrid polymer composite was investigated. Microphotographs of wetting of fibers of different nature by liquids were obtained by the optical method, by which the edge angles of wetting were determined, tests were carried out to determine the bending strength of polymer composites. A method for predicting the flexural strength of hybrid polymer composites made by vacuum infusion method has been proposed and experimentally confirmed, which consists in linking the adhesive interaction of components, structural components and flexural strength by determining the change in their energy characteristics of the filler by wetting method.

Keywords: composite, oiling composition, appret, adhesion, adhesion work, free surface energy.

REFERENCES

1. An Essay on the Cohesion of Fluids – by Thomas Yong 1805 Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp.65–87.

2. Theorie mecanique de la chaleur. by Athanase M. Dupre, Paul Dupre. Publication date 1869. Publisher Gauthier-Villars. 517 p.

3. Starostina I.A., Stoyanov O.V. Development of methods for evaluation of surface acid-base properties of polymeric materials [Razvitie metodov ocenki poverhnostnyh kislotno-osnovnyh svojstv polimernykh materialov]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2010. No. 4. Pp. 58–68. (rus)

4. Karzov I.M., Alentiev A. Yu., Bogdanova Yu.G., Kostina Yu.V., Shapagin A.V. The influence of «fiber-matrix interface energetic characteristics on the polymer composite strength. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2010. V.51. No. 6. Pp. 462–470.
5. Tiwari S., Bijwe J. Surface treatment of carbon fibers – a review. *Procedia Technology*. 2014. Vol. 14. Pp. 505–512.
6. Mahltig B., Kyosev Y. *Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications*. Woodhead Publishing. 2018. 343 p.
7. Valueva M.I., Zelenina I.V., Haskov M.A., Gulyaev A.I. Fiber preparation for interphase coating for ceramic matrix composites [Podgotovka volokna k naneseniyu interfaznogo pokrytiya dlya kompozicionnykh materialov s keramicheskoy matricей]. *Trudy VIAM*. No. 10 (58). 2017. Pp. 79–89. (rus)
8. Petrova G.N., Bejder E.Ya. Development and research of application compositions for thermoplastic carbon plastics [Razrabotka i issledovanie appetiruyushchih sostavov dlya termoplastichnykh ugleplastikov]. *Trudy VIAM*. 2016. No. 12 (46). Pp. 65–73. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9. (rus)
9. Patent RF 2699100. Method of preparation of aqueous epoxy dispersion [Sposob polucheniya vodnoi epoksidnoi dispersii]. Semenov A.N., Starovoitova I.A. Declared 01.04.2019. Published 03.09.2019. (rus)
10. Thomason, J., Nagel U., Yang L., Bryce D. A study of the thermal degradation of glass fibre sizings at composite processing temperatures. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 30 Jun 2019. Vol.121. Pp. 56–63. DOI:10.1016/j.compositesa.2019.03.013.
11. Thomason, J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing*. February 2020. Vol. 85. Pp. 1–24. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2020.106421.
12. Bryce D., Liu Y., Thomason J. An investigation of fibre sizing on the interfacial strength of glass-fibre epoxy composites. Contribution to conference - Mechanical And Aerospace Engineering. 24 June 2018. Pp. 1–8.
13. Valiev A.I., Shakirzyanov F.R., Suleymanov A.M., Nizamov R.K. Estimation of stress-strain state of hybrid polymer composites manufactured by vacuum infusion method [Ocenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gibridnykh polimernykh kompozitov, izgotovlennykh metodom vakuumnoj infuzii]. *News KSUAE*. 2023. No. 4(66). Pp. 241–254. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_241. (rus)
14. Chen C., Gu G. Machine learning for composite materials. *MRS Communications*. 2019. No. 9. Pp. 1–11. DOI: 10.1557/mrc.2019.32.
15. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Akkerman R., Hattel J. A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. *Arch Computation Methods Eng*. 2016. No. 24. Pp. 365–395. DOI: 10.1007/s11831-016-9167-2.
16. Ramprasad R., Batra R., Paliana G., Manodi-Kanakkithodi A., Kim C. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. *NPJ Computational Materials*. 2017. No. 3. Pp. 1–27. DOI:10.1038/s41524-017-0056-5.
17. Yang C., Kim Y., Ryu S., Gu G. Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks. *Materials & Design*. 2020. Pp. 1–9. No. 189. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108509.

Information about the authors

Valiev, Almaz I. Postgraduate student. E-mail: tatcomposite@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Starovoitova, Irina A. PhD. E-mail: irina-starovoitova@yandex.ru. LCC «Rekon». Russia, 420095, Kazan, st. Vasilchenko, 7B.

Suleymanov, Alfred M. DSc, Professor. E-mail: alfred-sulejmanov@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, st. Zelenaya, 1.

Received 03.03.2024

Для цитирования:

Валиев А.И., Старовойтова И.А., Сулейманов А.М. Адгезионное взаимодействие в гибридном композите. Связь энергетических характеристик фаз с прочностью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-17-26

For citation:

Suleymanov K.A., Lesovik V.S., Pogorelova I.A., Ryabchevskiy I.S. Study of the macroporous structure of cellular concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 3. Pp. 17–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-17-26

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37

***Осипова Н.Н., Яковлев Д.С.**

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

*E-mail: osnat75@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГАЗОМ

Аннотация. Внедрение в практику газоснабжения новых прогрессивных материалов приводит к созданию новых изделий с улучшенными качествами. Для коммунально-бытового применения наряду с традиционными металлическими баллонами для сжиженного углеводородного газа в последнее время предлагаются композитные баллоны. Обладая рядом неоспоримых преимуществ, композитные баллоны ежегодно увеличивают долю присутствия в сфере баллонного газоснабжения. Однако переход с традиционных металлических баллонов не должен сопровождаться банальной заменой сосудов, а требует всестороннего, грамотного подхода к применению системы газоснабжения на базе баллонов из композитных материалов у потребителя. Используя основные положения, характеризующие изменения состояний смесей газов, входящих в состав сжиженного углеводородного газа, принимая во внимание особенности теплообмена, исследуемых сосудов, принципы работы газоиспользующего оборудования у потребителя разработаны методические основы по эксплуатации композитных баллонов для коммунально-бытового обеспечения потребителя. В результате проведенных исследований определена масса газа для заполнения баллонов с учетом сезонности эксплуатации и марок, рекомендованных для коммунально-бытового потребления, исследован процесс генерации паровой фазы в суточном цикле эксплуатации для обеспечения пищевого приготовления и горячего водоснабжения, определены периоды непрерывной работы индивидуальной баллонной установки с различной вместимостью одиночного композитного баллона и количество замен баллонов в годовом цикле эксплуатации.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, композитный баллон, масса газа, коэффициент теплопередачи, периодическое использование, период эксплуатации.

Введение. По оценкам мировых экспертных агентств объем рынка баллонов сжиженного углеводородного газа (СУГ) в мире ежегодно будет расти в среднем на 6,73 % в период с 2022 по 2027 год и на 9,1 % с 2027 по 2030 годы [1–3]. При этом применению композитных баллонов у конечного потребителя в сфере жилья, коммерции и промышленности прогнозируют уверенный ежегодный рост не менее 4,1 % [1, 3]. Перспективу расширения применения композитных баллонов обеспечивают увеличение требований в стандартах безопасности по использованию газового топлива разных стран, улучшение качества композитных баллонов по сравнению с металлическими и алюминиевыми аналогами и широкий типоразмерный ряд сосудов вместимостью от 1 л до 47 л [4, 5]. Также, в качестве предпосылки к расширению сфер применения сжиженного углеводородного газа, в том числе и баллонного газоснабжения, необходимо отметить продолжающееся увеличение численности населения и урбанизацию мелких поселений за счет миграции, рост количества фермерских хозяйств, растениеводческих и животноводческих площадок, обособленных туристических зон в труднодоступных районах [6–8]. Наибольший прирост рынка потребления сжиженного углеводородного газа и перспективу развития применения композитных баллонов демонстрируют страны

Азиатско-Тихоокеанского региона, включающего в себя 16 стран островных государств Северо-Восточной, Юго-Восточной и Южной Азии, а также южной части Тихого океана, прогнозный вклад которых за рассматриваемый период составит 44 % от общего потребления в мире [2]. Расширение использования сжиженного углеводородного газа в различных отраслях хозяйства, в областях, не имеющих перспективы снабжения природным газом, позволит уменьшить энергетическую бедность населения, благодаря переходу с угля, дров, мазута на более совершенный вид топлива [8, 9].

Не смотря на увеличение использования композитных баллонов в России и мире, исследования по основам эксплуатации баллонов, заключающиеся в обосновании массы газа, заливаемой в баллон при заправке, протекании процессов регазификации жидкой фазы в композитных баллонах в различных климатических условиях, выборе оптимальных режимов использования баллонов у потребителя, обосновании возможности обеспечения различных нужд потребителя от баллонов различной вместимости, рекомендациях по продолжительности использования баллонов до очередной заправки или обмена, представлены в научной литературе весьма ограничено. Отдельные исследования посвящены изу-

чению свойств композитных материалов для изготовления баллонов необходимой прочности [5, 10, 11], сравнению представленных на рынке металлических и композитных баллонов [10, 12], внедрению систем отслеживания уровней заполнения композитных баллонов [9, 13]. Есть отдельные упоминания по фракционности испарения газа в баллонах и приведению смеси к требуемому числу Воббе для правильной работы горелок газоиспользующего оборудования [14, 15].

Отмечен целый ряд исследований для металлических баллонов сжиженного углеводородного газа, в которых даны рекомендации по эксплуатации, определению паропроизводительности, периоду использования у потребителя [16–19]. Однако в силу значительных отличий по составу материалов, конфигурации, вместимости баллонов, имеющиеся расчетные зависимости и рекомендации не могут быть применены к баллонам из композитных материалов, что формирует значительное количество вопросов по применению данных баллонов для газификации потребителей вместо стальных.

Особенностью сжиженных углеводородных газов является то, что они имеют значительный коэффициент объемного расширения, способствующий изменению объема жидкости в сосуде при колебаниях температуры окружающей среды [17]. Нагрев жидкой фазы приводит к ее расширению и при полном заполнении металлического сосуда происходит сброс части жидкости через предохранительные устройства. Для исключения сброса жидкой фазы из баллона и предотвращения возможного разрыва оболочки (для металлических баллонов), предельная температура возможного нагрева баллонов, устанавливаемых наземно открытым способом, составляет плюс 65 °С с максимальным уровнем заполнения сосудов 85 %, соответствующие объемному расширению жидкости, формирующей максимально разрешенное избыточное давление в сосуде сжиженного углеводородного газа до 1,6 МПа. Учитывая улучшенные прочностные свойства композитных баллонов, в которых максимальное избыточное давление в сосуде принимается 2,0 МПа, рекомендуемый уровень заполнения по ГОСТ 54982 в основном характерный для металлических баллонов и резервуаров, являющийся единым для сжиженных углеводородных газов различного компонентного состава обуславливает гарантированный недолив в сосуд сжиженного газа марок, с низким содержанием пропана и повышенным содержанием бутана, так как пропан в составе смеси имеет больший коэффициент объемного расширения и формирует при прочих равных условиях большие давления по сравне-

нию с компонентом бутан, что приводит к не рациональному использованию композитных баллонов различной вместимости.

Эксплуатационная практика систем газоснабжения с применением СУГ показала, что определяющим критерием при генерации газовой фазы является процесс обмена тепла сосуда с окружающей средой [16, 19–21]. В то же время, сведения по особенностям передачи тепла жидкой фазе СУГ через стенку композитного баллона в известной литературе отсутствуют. Отличие композитных баллонов по материалу изготовления, формфактору сосуда, толщине стенки, максимальному избыточному давлению, не позволяют применять коэффициенты теплопередачи, используемые при расчете металлических сосудов с поправочными корректирующими значениями. При этом определить паропроизводительность композитного баллона, его продолжительность работы у потребителя при использовании газа на цели пищеприготовления и горячее водоснабжение представляется весьма затруднительным.

В связи с ранее сказанным, задачами, раскрывающими суть исследований, являются:

- определение максимального заполнения композитных баллонов сжиженным газом с учетом сезонности эксплуатации и состава газа;
- исследование режимов работы баллонов с учетом неравномерности генерации паровой фазы в суточном цикле эксплуатации с учетом обеспечения потребности пищеприготовления и горячего водоснабжения потребителей с варьированием остаточного содержания жидкой фазы в баллоне и сезона эксплуатации;
- определение периода непрерывной работы индивидуальной баллонной установки и количества замен баллонов в годовом цикле эксплуатации.

Методика. Для решения поставленных задач используются методы математического моделирования, методы анализа изучаемых свойств объектов исследований, методы обобщения и корреляции полученных результатов с помощью ЭВМ, графические методы интерпретирования полученных результатов.

В качестве объектов исследований приняты композитные баллоны, применяемые для газоснабжения потребителей и представленные на рынке Российской Федерации, выпускаемые отечественными (Rugasco Compolite CS, Россия) и зарубежными (Hexagon Ragasco LPG, Норвегия; Supreme, LiteSafe, Индия; Burhan Gas, Пакистан; HPC Research LPG, Чешская Республика) производителями [3–5].

Коэффициент заполнения баллона газом, состоящим из i компонентов, определится как отношение объемного расширения при действительной температуре к объемному расширению при максимально допустимой температуре нагрева:

$$k_3 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{v_{ж}}, \quad (1)$$

где v_i – удельный объем i -компонента при действительной температуре жидкой фазы в момент заполнения сосуда, м³/кг; $v_{ж}$ – удельный объем жидкой фазы многокомпонентного газа при максимально допустимой температуре нагрева при наземной установке сосуда, принимаемой равной плюс 65 °С, м³/кг [17].

Согласно ГОСТ Р 20488, все марки сжиженного углеводородного газа преимущественно состоят из пропана и бутана в различных количественных соотношениях, которые в соответствии с правилом аддитивности формируют общий объем жидкой фазы в баллоне, определяемый по диаграммам состояния при максимально допустимой температуре в насыщенном состоянии [16].

Тогда, предельно допустимый объем жидкой фазы в баллоне, м³:

$$V'_6 = \frac{V_6(a v_{пр} + b v_6)}{v_{ж}}, \quad (2)$$

где a, b – содержание в жидкой фазе газа пропана и бутана, % (вес.).

Предельно допустимая масса жидкой фазы в баллоне, кг:

$$M_{Г}^{\max} = V'_6 \rho_{см}, \quad (3)$$

где $\rho_{см}$ – плотность жидкой фазы СУГ, кг/м³.

Принимая во внимание исследования авторов, представленных в научной работе [22], с учетом формул (1-3), коэффициент теплопередачи стенки композитного баллона СУГ для наиболее распространенных в практике эксплуатации типоразмеров баллонов вместимостью от 5 л до 47 л, с учетом динамики изменения массы жидкой фазы газа в баллоне в диапазоне 0,1

$M_{Г}^{\max} \leq M_{Г} \leq M_{Г}^{\max}$, при протекании процесса теплопередачи в условиях естественной конвекции, при наихудших условиях эксплуатации с изменением скорости движения воздуха около рассматриваемого баллона $v=0$ м/с, может быть представлен в виде корреляционной зависимости с коэффициентом корреляции $R^2=0,994$, Вт/(м²°С):

$$k = 0,054 \frac{M_{Г}}{M_{Г}^{\max}} \left[\frac{11M_{Г}^2}{(M_{Г}^{\max})^2} + \frac{M_{Г}}{M_{Г}^{\max}} - 3,32 \right] + 4,34. \quad (4)$$

Количество испаренного газа в баллоне при постоянном отборе паровой фазы на нужды потребителя, кг/ч, определяется по формуле [16]:

$$g = \frac{k F_{см} (t_{в} - t_{ж})}{r}, \quad (5)$$

где k – коэффициент теплопередачи стенки баллона Вт/(м²°С); $F_{см}$ – смоченная поверхность баллона жидкой фазой газа, м²; $t_{в}$ – температура окружающей среды, °С; $t_{ж}$ – температура сжиженного газа в баллоне, °С; r – скрытая теплота парообразования сжиженного газа, (Вт·ч)/кг.

Реальная эксплуатация баллонов СУГ показала, что отбор паровой фазы из баллона носит не постоянный характер, чередующий периоды отдыха баллона и периоды использования газа. В научной работе [23] авторами рекомендовано определять паропроизводительность баллона с учетом поправочного коэффициента неравномерности генерации паровой фазы:

$$\gamma = \frac{e^{-x} - e^{-w}}{1 - e^{-w}}, \quad (6)$$

где x, w - показатели степени, которые, в свою очередь, определяются как:

$$x = \frac{k F_{см}^I \tau_{кон}}{c_{Г} M_{Г}^I + c_{ст} M_{ст}^I}; \quad (7)$$

$$w = \frac{\tau_{исп} k F_{см}^I}{c_{Г} M_{Г}^I + c_{ст} M_{ст}^I}, \quad (8)$$

где $F_{см}^I$ – смоченная поверхность баллона, соответствующая режиму испарения газа, м²; τ – время, ч; $c_{Г}; c_{ст}$ – теплоемкость сжиженного газа и стенки баллона соответственно, кДж/кг·К; $M_{Г}^I, M_{ст}^I$ – масса жидкой фазы газа в баллоне, в период испарения и корпуса баллона, контактирующего с жидкой фазой, кг.

Учитывая, что потребителю всегда предоставляется минимально 2 баллона: один основной, другой обменный, для возможности формирования периода ожидания замены опорожненного баллона, годовое количество заправок индивидуальной баллонной установки сжиженным газом определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{G_{год} n}{1,8 M_{Г}^{\max}}, \quad (9)$$

где $G_{год}$ – годовой расход сжиженного газа потребителем, с учетом расходования газа на

нужды пищевого приготовления и горячего водоснабжения кг/(чел год) [24]; n – коэффициент заселенности квартиры, чел.

Период эксплуатации индивидуальной баллонной установки между соседними заправками z , сут, составляет:

$$z = 365\varepsilon^{-1}. \quad (10)$$

Результаты. Согласно выражениям (1-10) были проведены соответствующие расчеты при следующих исходных данных:

– состав сжиженного углеводородного газа согласно ГОСТ 20488: пропан технический (ПТ), пропан-бутан технический (ПБТ), бутан технический (БТ);

– диапазон изменения температур жидкой фазы СУГ от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– вместимость композитных баллонов 5 л; 12,7 л; 24,5 л; 47 л;

– длительность потребления газа в сутки: от 1 ч до 24 часов;

– заполнение баллона жидкой фазой газа – M_{Γ}^{\max} ; $0,5 M_{\Gamma}^{\max}$; $0,1 M_{\Gamma}^{\max}$;

– потребление газа: пищевого приготовления 1,1 кг/ч (максимальное); 0,068 кг/ч (минимальное); пищевого приготовления и горячее водоснабжение – 1,58 кг/ч (по техническим паспортам оборудования);

– коэффициент суточной неравномерности газопотребления жилыми домами, оборудованными газовыми плитами и водонагревателями составляет $k_{\text{сут}}=0,7$ согласно СП 42-101-2003.

Результаты расчета, обобщения полученных данных и их анализа представлены в табл. 1–4 и на рис. 1.

Таблица 1

Коэффициент заполнения баллонов жидкой фазой газа

Температура жидкой фазы, $^{\circ}\text{C}$	Марка СУГ (ГОСТ 20488)		
	ПТ	ПБТ	БТ
-30	0,77	0,79	0,79
-20	0,79	0,80	0,81
-10	0,80	0,81	0,82
0	0,81	0,83	0,83
10	0,84	0,85	0,86
20	0,87	0,88	0,88
30	0,91	0,91	0,91
40	0,95	0,94	0,94

Как видно из таблицы 1, уровень заполнения баллона изменяется в зависимости от температуры жидкой фазы, увеличиваясь при повышении последней. В рамках одной марки газа с неизменяемым начальным компонентным составом сжиженного газа колебания уровня заполнения составляют от 77–79 % до 94–95 %, при этом наибольшее расхождение наблюдается у марки газа «пропан технический» к минимальной величине заполнения, что составляет 23,4 %. Если принимать во внимание практику заполнения независимо от марки газа и температуры жидкой фазы до уровня газа в баллоне 85 %, отклонения по переливу в холодный период года составят от 4,7 % до 9,4 % в зависимости от температуры заливаемого газа (верхняя область таблицы, заливка синим).

Учитывая применение марок газа «пропан-бутан технический» и «бутан технический» преимущественно в теплый период года для газоснабжения населения, то в зависимости от температуры жидкого газа, заливаемого в баллон недолив газа по отношению к общепринятому уровню

может составлять до 10,6 % (нижняя область таблицы, заливка розовым).

Данное обстоятельство приводит к переливу жидкой фазы в холодный период времени года при отрицательных температурах при использовании марки газа «пропан технический» (верхняя область таблицы, заливка синим) и соответственно недоливу в сосуды жидкой фазы при положительной температуре окружающей среды (нижняя область таблицы, заливка розовым), что снижает возможность по качественному использованию вместимости сосудов.

Предельно допустимая масса газа, рекомендуемая к заполнению в баллон, в зависимости от компонентного состава представлена в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, заполнение баллона по массе остается постоянным при изменении температуры жидкой фазы и в рамках любого компонентного состава газа. Масса заливаемого газа при заполнении баллонов марками газов с увеличением содержания в смеси бутана растет, достигая у «бутана технического» 22,45 кг для

баллона вместимостью 47 л, что на 7,3 % больше по сравнению с зимней смесью «пропан технический» для аналогичного баллона. Таким образом, при заправке баллонов газов необходимо ориентироваться не на уровень заполнения, а на марку

газа и заливаемую массу, которую необходимо определять при непосредственной заправке баллонов контрольным взвешиванием перед отпуском потребителю.

Таблица 2

Предельно допустимая масса газа для заполнения баллонов жидкой фазой

Вместимость баллона, л	Масса жидкой фазы к заполнению баллона для марки СУГ (ГОСТ 20488) M_{Γ}^{\max} , кг		
	ПТ	ПБТ	БТ
5	2,22	2,34	2,39
12,7	5,65	5,94	6,06
24,5	10,91	11,46	11,7
47	20,92	21,99	22,45

Варьирование времени отдыха и использования баллонов, при изменении массы жидкого газа

для сосудов вместимостью от 5 литров до 47 литров, позволила получить коэффициент неравномерности генерации паровой фазы (табл. 3).

Таблица 3

Значения коэффициента неравномерности генерации паровой фазы при периодическом использовании баллонов

Отношение периода использования газа к периоду отдыха баллона	Значение коэффициента γ при заполнении сосуда, кг											
	M_{Γ}^{\max}				$0,5 M_{\Gamma}^{\max}$				$0,1 M_{\Gamma}^{\max}$			
	и вместимости сосуда, л											
	5	12,7	24,5	47	5	12,7	24,5	47	5	12,7	24,5	47
1/23	2,89	3,71	4,54	5,31	2,85	3,69	4,48	5,19	2,40	3,03	3,61	5,19
2/22	1,75	2,14	2,55	2,93	1,73	2,13	2,52	2,87	1,52	1,81	2,09	2,87
4/20	1,22	1,40	1,58	1,76	1,22	1,39	1,57	1,74	1,13	1,25	1,38	1,74
6/18	1,08	1,18	1,29	1,40	1,08	1,18	1,28	1,38	1,04	1,10	1,17	1,38
8/16	1,03	1,09	1,16	1,23	1,03	1,09	1,15	1,22	1,01	1,04	1,08	1,22
10/14	1,01	1,04	1,09	1,14	1,01	1,04	1,08	1,13	1,00	1,02	1,04	1,13
12/12	1,01	1,02	1,05	1,08	1,01	1,02	1,05	1,08	1,00	1,01	1,02	1,08
14/10	1,00	1,01	1,03	1,05	1,00	1,01	1,03	1,05	1,00	1,00	1,01	1,05
16/8	1,00	1,01	1,02	1,03	1,00	1,01	1,02	1,03	1,00	1,00	1,01	1,03
18/6	1,00	1,00	1,01	1,02	1,00	1,00	1,01	1,02	1,00	1,00	1,00	1,02
20/4	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,01
24/0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Как видно из таблицы 3, коэффициент неравномерности генерации паровой фазы имеет максимальные значения при начальном уровне заполнения не зависимо от вместимости комбинированных баллонов и минимальном использовании баллонов в сутки до одного часа, при этом уменьшение массы газа в баллонах при очередном старте эксплуатации уменьшает генерацию паровой фазы во время отдыха, снижаясь до единицы при минимальном уровне заполнения. Отдых баллонов приводит к накоплению паровой фазы над зеркалом испарения в сосудах, при этом генерация паровой фазы увеличивается для баллона 5 литров в 2,89 раза, а для баллона 47 литров в 5,31 раза.

Таким образом, увеличение периода отдыха баллонов при их эксплуатации обеспечивает генерацию дополнительного объема паровой фазы,

что способствует обеспечению необходимого количества паровой фазы в период потребления газа на покрытие коммунально-бытовых нужд потребителя.

Увеличение периода непрерывной эксплуатации баллона переводит его в режим постоянной генерации паровой фазы и определение паропроизводительности баллона в этом случае, производится по формуле (5).

Как показали проведенные исследования, периодичность использования баллонов сжиженного углеводородного газа оказывает значительное влияние на величину паропроизводительности (рис. 1). При эксплуатации баллонов в переменном режиме, сочетающем потребление и отдых, паропроизводительность увеличивается не зависимо от сезона эксплуатации.

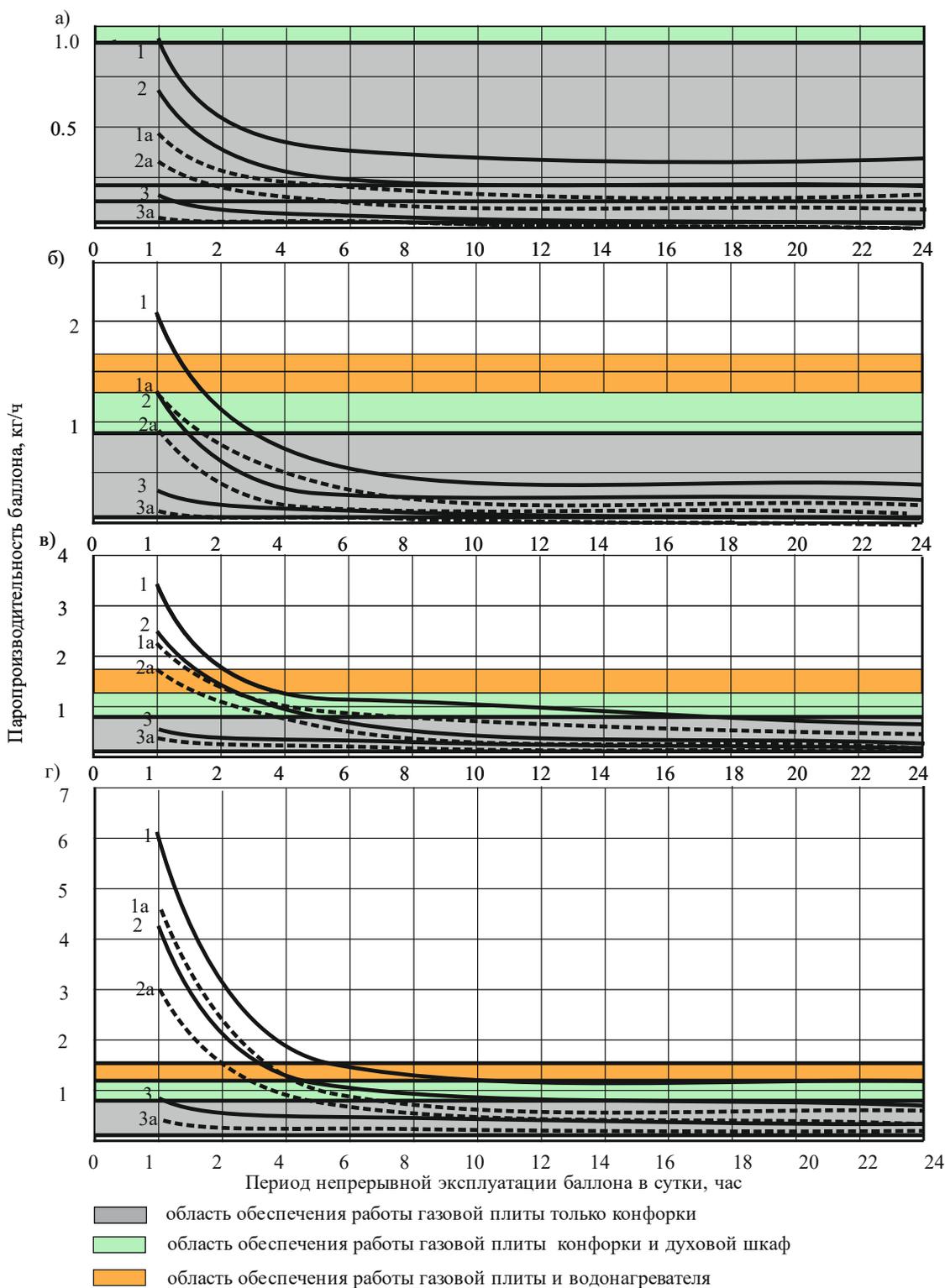


Рис. 1. Парпроизводительность композитных баллонов вместимостью: а) 5 л; б) 12,7 л; в) 24,5 л; г) 47 л при периодическом использовании газа:

в теплый период: 1 – при заполнении M_{Γ}^{\max} ; 2 – при заполнении $0,5 M_{\Gamma}^{\max}$; 3 – при заполнении $0,1 M_{\Gamma}^{\max}$;

в холодный период: 1а – при заполнении M_{Γ}^{\max} ; 2а – при заполнении $0,5 M_{\Gamma}^{\max}$; 3а – при заполнении $0,1 M_{\Gamma}^{\max}$

В то же время использование баллона вместимостью 5 литров не обеспечивает газоснабжение даже на нужды пищевого приготовления в любом сезоне эксплуатации. При полной мощности

газопотребления и первоначальном заполнении баллона, его использование рекомендуется только для работы одной или двух конфорок в любом диапазоне непрерывного использования (нижняя граница области обеспечения работы

газовой плиты – эксплуатация маломощной конфорки 0,6 кВт), при этом работа водонагревателя при подключении к баллону невозможна.

Баллон вместимостью 12,7 литров гарантированно обеспечивает работу газовой плиты при использовании газа всеми горелками до 1,5 часов в сутки в диапазоне заполнения от M_{Γ}^{\max} до $0,5M_{\Gamma}^{\max}$. Работа проточного водонагревателя в теплый период обеспечивается при уровне заполнения баллона M_{Γ}^{\max} при непрерывной работе в сутки до 1,0 часа. В зимний период эксплуатации обеспечивается работа всех газовых конфорок при непрерывном газопотреблении до 1,0 часа в сутки при заполнении баллона газом от M_{Γ}^{\max} до $0,5M_{\Gamma}^{\max}$, в остальное время непрерывного использования совместная работа всех конфорок не возможна и работа газовой плиты обеспечивается работой 2 конфорок. Работа проточного газового нагревателя не возможна, независимо от заполнения баллона газом.

Баллон вместимостью 24,5 литра обеспечивает полноценную работу газовой плиты до 2 часов при снижении массы газа до $0,5M_{\Gamma}^{\max}$. При минимальной массе газа в баллоне баллон обеспечивает работу газовой конфорки минимальной мощности при переходе на постоянный режим использования. Приготовление горячей воды возможно при снижении заполнения баллона до $0,5M_{\Gamma}^{\max}$ и

непрерывном использовании до 1,5 часов в сутки. В зимний период устойчивая работа газовой плиты обеспечивается при непрерывном использовании газа до 1,5 часов в сутки в зависимости от массы газа в баллоне, приготовление горячей воды до 1 часа непрерывного использования водонагревателя.

Баллон вместимостью 47 литров обеспечивает максимальное использование газа на нужды пищеприготовления до 4,2 часа непрерывного использования в диапазоне изменения массы газа в баллоне от M_{Γ}^{\max} до $0,5M_{\Gamma}^{\max}$ в летний период и до 2,4 часа в зимний период. При уменьшении количества газа баллон обеспечивает устойчивую работу 2 газовых конфорок вплоть до переключения на другой баллон в баллонной установке. Приготовление горячей воды обеспечивается до 3 часов непрерывного использования в сутки в теплый период и до 2 часов в сутки в холодный период.

При снижении массы газа от $0,5M_{\Gamma}^{\max}$ до $0,1M_{\Gamma}^{\max}$ при вместимости баллона от 12,7 до 47 литров генерация паровой фазы баллонов обеспечивает работу 1 или 2 газовых конфорок, обуславливая минимальный уровень газопотребления в любой период эксплуатации системы (кривые 3 и 3а).

Вместимость баллонов и направление использования газа определяют длительность их непрерывной эксплуатации у потребителя и количество замен (обменов) баллонов (табл. 4).

Таблица 4

К определению количества заправок и периода непрерывной эксплуатации индивидуальной баллонной установки в год

Вместимость баллона, л	Количество заправок в год, шт			Период непрерывной эксплуатации, сут		
	при наличии в квартире газовой плиты					
	и централизованного горячего водоснабжения при газоснабжении	и отсутствии централизованного горячего водоснабжения и газового водонагревателя	и газового водонагревателя (при отсутствии централизованного горячего водоснабжения)	и централизованного горячего водоснабжения при газоснабжении	и отсутствии централизованного горячего водоснабжения и газового водонагревателя	и газового водонагревателя (при отсутствии централизованного горячего водоснабжения)
5	74	111	-	4,9	3,3	-
12,7	29	44	-	12,5	8,4	-
24,5	15	23	39	24,2	16,1	6,2
47	8	12	20	46,4	30,9	12,0

Как видно из таблицы 4, меньший период эксплуатации баллонной установки обеспечивается при совместной работе газовой плиты и проточного водонагревателя, при обеспечении нужд горячего водоснабжения и пищеприготовления, составляя 12 суток при использовании газовых

баллонов вместимостью 47 литров. Баллоны 5 л и 12,7 литров не обеспечивают совместной работы газовой плиты и водонагревателя, баллоны 24,5 литров требуют замены через 6,2 суток, что является не приемлемым с точки зрения обеспечения своевременности подвоза баллонов потребителю

для обмена. Наиболее продолжительный период обуславливает использование баллонов для работы газовой плиты с целью только пищевого приготовления. Максимальный срок эксплуатации баллонов составит до 46 суток при баллонах вместимостью 47 литров.

Проведенные исследования показали, что композитные баллоны малой вместимости 5 литров могут использоваться как источники временного газоснабжения, обеспечивая минимальное газопотребление в основном для разогрева пищи без приготовления горячей воды. Указанные баллоны не могут быть рекомендованы как источники газоснабжения жилых зданий при первичной газификации объектов до момента подключения к сетям природного газа.

Баллоны вместимостью от 12,7 до 24,5 литров могут использоваться для обеспечения пищевого приготовления. При этом приготовление горячей воды будет обеспечиваться только в начальный период эксплуатации баллонов, что не позволит иметь устойчивое горячее водоснабжение.

Применение баллонов вместимостью 47 литров обеспечивает пищевое приготовление и горячее водоснабжение, при этом количество баллонов в групповой установке должно приниматься из расчета двухнедельного запаса в холодный период времени года с учетом неустойчивости погоды и возможных трудностей с доставкой баллонов потребителям. Для этих целей необходимо применять индивидуальные и групповые баллонные установки, выносимые за пределы жилого здания с учетом расстояний, согласованных с правилами безопасности и сводами правил по эксплуатации баллонных установок согласно расчету соответствующего газопотребления объектом.

Выводы.

1. Для повышения эффективности использования вместимости композитных баллонов, рекомендовано заполнение баллонов осуществлять по массе заливаемого газа с учетом сезона эксплуатации и марки СУГ. Учет заполнения баллонов по массе позволит увеличить количество наливаемой жидкости в баллон в теплый период эксплуатации до 5,1 % при марке сжиженного углеводородного газа «пропан-бутан технический» и до 7,3 % при марке газа «бутан технический».

2. Определен коэффициент неравномерности генерации паровой фазы в баллоне при периодическом использовании сосудов, зависящий от конструктивных особенностей, температур окружающей среды и жидкой фазы газа, компонентного состава СУГ. Оценка паропроизводительности композитных баллонов с учетом коэффициента неравномерности генерации паровой фазы,

показала, что для нужд пищевого приготовления и горячего водоснабжения рекомендуется применять индивидуальные и групповые баллонные установки с вместимостью одиночного баллона не менее 47 литров, при этом максимальная генерация паровой фазы баллоном достигается при использовании его до 4,2 часов сутки в теплый период и до 2,4 часов в сутки в холодный период.

3. Определена продолжительность непрерывной эксплуатации баллонов и количество обменов баллонов в годовом режиме эксплуатации для обеспечения бесперебойного газоснабжения потребителей с обеспечением нужд пищевого приготовления и горячего водоснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity // Analysis and Industry Forecast, 2021-2030. CP: Storage And Distribution, 2022. 353 p.

2. Liquefied Petroleum Gas Cylinder Market by Type, End-user and Geography. Oil & Gas Storage & Transportation // Forecast and Analysis 2023-2027, 2023. 162 p.

3. LPG Composite Cylinders Market Outlook Report - Industry Size, Trends, Insights, Market Share, Competition, Opportunities, and Growth Forecasts by Segments, 2022 to 2030 // Region: Global. 2023. 146 p.

4. Aburi Composite LPG Cylinders. London. United Kingdom, 2022. 11 p.

5. Composite cylinders use and handling in the propane industry // Propane Education & Research. 2022. 16 p.

6. Зуев А. Курс на полную газификацию // ТЭК России. 2021. № 2. С.14–17.

7. Тульцов В.А. Применение композитных газовых баллонов при газоснабжении потребителей // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. 2019. Т. 1. № 1 (44). С. 115–118.

8. Kojima M. The Role of Liquefied Petroleum Gas in Reducing Energy Poverty // World Bank. Oil, Gas, and Mining Policy Unit Working, 2011. 108 p.

9. WLPGA (The World LPG Association) Guide to Good Industry Practices for LPG Cylinders in the Distribution Channel 2019 // World Liquefied Petroleum Gas Association, 2019. 55 p.

10. Abdirashidov A.A., Nurgobilov N.K. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders // European Scholar Journal (ESJ). 2021. Vol. 2 №. 1. Pp. 27–28. <https://www.scholarzest.com>

11. Zhu Z., Zhang J., Zhan M., Di C. Ultimate strength of aluminium-steel composite cylinders under hydrostatic pressure // Journal of Mechanical Science and Technology. 2023. Vol. 37. Pp. 3303–3313.

12. Harrison S.B. Composite gas cylinders for fuel gases. Gasworld, 2021. Pp. 30–33.

13. Tripathi A., Kumar A., Chandrakar M.K. Design and Analysis of a Composite Cylinder for the Storage of Liquefied Gases // International Journal for Scientific Research & Development. 2017. Vol. 5. Iss. 03. Pp. 871–876.

14. Tian G. Simulation of the LPG component changes during the spontaneous vaporization // Journal of Fuel Chemistry and Technology. 2003. Pp. 1562–1567.

15. Shi G.-H., Aye L., Liu Y.-C., Du X.-J. Dynamic simulation of liquefied petroleum gas vaporization for burners // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 137 (5) Pp. 575–583. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2018.04.030.

16. Клименко А.П. Сжиженные углеводородные газы. М.: Гостехиздат. 1962, 429 с.

17. Стаскевич Н.Л., Вигдорчик Д.Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. Л.: Недра. 1986, 543 с.

18. Курицын Б.Н. Повышение надежности газоснабжения от баллонных установок сжиженного газа // Газ России. М. 2005. С. 30–31.

19. Курицын Б.Н., Постарнак Д.А. Моделирование теплообмена в установках баллонного снабжения сжиженным газом // Материалы Международной научно-практической конференции

«Культурно-историческое наследие строительства: вчера, сегодня, завтра». Саратов: СГАУ, 2014. С. 69–72.

20. Бычкова И.М., Поберий А.А. К определению коэффициента теплопередачи при теплообмене горловины подземного резервуара с окружающим грунтовым массивом // Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. Саратов, 2018. № 9. С. 282–288.

21. Cristescu T. On a Class of Thermodynamic Process Involved in the Transport and Storage of Liquefied Petroleum Gas // Oil & Gas University of Ploiesti Bulletin. Technical Series. 2010. Vol. 62. № 3B. Pp. 162–168.

22. Osipova N.N., Grishin B.M. Modeling of operating modes gas composite cylinders // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. №3 (51). Pp. 63–74. DOI:10.36622/VSTU.2021.51.3.005

23. Osipova N.N., Kulyaev S.G., Orlova U.A. Evaporation capacity of liquefied petroleum gas composite vessels in natural regasification mode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 272. Pp. 255–262. DOI:10.1007/978-981-16-8759-4_27

24. Методика расчета норм потребления сжиженного углеводородного газа населением при отсутствии приборов учета газа: приказ Министерства регионального развития РФ от 15 августа 2009 г. № 340 // Собрание законодательства РФ. М., 2006. № 25. Ст. 2733.

Информация об авторах

Осипова Наталья Николаевна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело». E-mail: osnat75@mail.ru. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Россия, 410054, г. Саратов, улица Политехническая 77.

Яковлев Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело». E-mail: dimon96@bk.ru. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Россия, 410054, г. Саратов, улица Политехническая 77.

Поступила 26.01.2024 г.

© Осипова Н.Н., Яковлев Д.С., 2024

***Osipova N.N., Yakovlev D.S.**

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**E-mail: osnat75@mail.ru*

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL FRAMEWORKS FOR THE OPERATION OF COMPOSITE CYLINDERS IN MUNICIPAL GAS SUPPLY TO CONSUMERS

Abstract. *The introduction of new advanced materials into gas supply practice leads to the creation of new products with improved qualities. For domestic use, along with traditional metal cylinders for liquefied petroleum gas, composite cylinders have recently been offered. Possessing a number of undeniable advantages, composite cylinders annually increase their share of presence in the field of bottled gas supply. However, the transition from traditional metal cylinders should not be accompanied by a banal replacement of vessels, but requires a comprehensive, competent approach to the use of a gas supply system based on*

cylinders made of composite materials at the consumer. Using the basic principles characterizing changes in the states of mixtures of gases included in liquefied hydrocarbon gas, taking into account the characteristics of heat exchange, the vessels under study, and the principles of operation of gas-using equipment at the consumer, methodological principles have been developed for the operation of composite cylinders for the consumer's household needs. As a result of the research, the mass of gas for filling cylinders was determined, taking into account the seasonality of operation and brands recommended for domestic consumption, the process of generating the vapor phase in the daily cycle of operation to ensure food preparation and hot water supply was investigated, and periods of continuous operation of an individual cylinder were determined in installations with different capacities of a single composite cylinder and the number of cylinder replacements in the annual operating cycle.

Keywords: liquefied hydrocarbon gas, composite cylinder, gas mass, heat transfer coefficient, periodic use, period of operation.

REFERENCES

1. Composite Cylinder Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Cylinder: Global Opportunity. Analysis and Industry Forecast, 2021-2030. CP: Storage And Distribution, 2022. 353 p.
2. Liquefied Petroleum Gas Cylinder Market by Type, End-user and Geography. Oil & Gas Storage & Transportation. Forecast and Analysis 2023-2027, 2023. 162 p.
3. LPG Composite Cylinders Market Outlook Report - Industry Size, Trends, Insights, Market Share, Competition, Opportunities, and Growth Forecasts by Segments, 2022 to 2030. Region: Global. 2023. 146 p.
4. Aburi Composite LPG Cylinders. London. United Kingdom, 2022. 11 p.
5. Composite cylinders use and handling in the propane industry. Propane Education & Research. 2022. 16 p.
6. Zuev A. The course to full gasification. Fuel and Energy Complex of Russia [Kurs na polnyu gazifikaciyu. TEK Rossii]. 2021. № 2. Pp. 14–17. (rus)
7. Tultsov V.A. Application of composite gas cylinders in gas supply of consumers. Improvement of methods of hydraulic calculations of culverts and treatment facilities [Primenenie kompozitnyh gazovyh ballonov pri gazosabzhenii potrebitel'ev. Sovershenstvovanie metodov gidravlicheskih raschetov vodopropusknyh i ochestnyh sooruzhenij]. 2019. Vol. 1. No. 1(44). Pp. 115–118. (rus)
8. Kojima M. The Role of Liquefied Petroleum Gas in Reducing Energy Poverty. World Bank. Oil, Gas, and Mining Policy Unit Working, 2011. 108 p.
9. WLPGA (The World LPG Association) Guide to Good Industry Practices for LPG Cylinders in the Distribution Channel 2019. World Liquefied Petroleum Gas Association, 2019. 55 p.
10. Abdirashidov A.A., Nurqobilov N.K. Analysis of composite polymer materials used in high pressure gas cylinders. European Scholar Journal (ESJ). 2021. Vol. 2 No. 1. Pp. 27–28. <https://www.scholarzest.com>
11. Zhu Z., Zhang J., Zhan M., Di C. Ultimate strength of aluminium-steel composite cylinders under hydrostatic pressure. Journal of Mechanical Science and Technology. 2023. Vol. 37. Pp. 3303–3313.
12. Harrison S.B. Composite gas cylinders for fuel gases. Gasworld, 2021. Pp. 30–33.
13. Tripathi A., Kumar A., Chandrakar M.K. Design and Analysis of a Composite Cylinder for the Storage of Liquefied Gases. International Journal for Scientific Research & Development. 2017. Vol. 5. Iss. 03. Pp. 871–876.
14. Tian G. Simulation of the LPG component changes during the spontaneous vaporization. Journal of Fuel Chemistry and Technology. 2003. Pp. 1562–1567.
15. Shi G.-H., Aye L., Liu Y.-C., Du X.-J. Dynamic simulation of liquefied petroleum gas vaporization for burners. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 137 (5) Pp. 575–583. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.030.
16. Klimenko A.P. Liquefied hydrocarbon gases [Szhizhennyye uglevodorodnyye gazy] Moscow.: Gostekhizdat.1962. 429 p. (rus)
17. Staskevich N.L., Vigdorichik D.Ya. Handbook of Liquefied Petroleum Gases [Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam]. L.: Nedra. 1986. 543 p. (rus)
18. Kuritsyn B.N. Increasing the reliability of gas supply from cylinder installations of liquefied gas [Povyshenie nadezhnosti gazosabzheniya ot ballonnyh ustanovok szhizhennogo gaza]. Gas of Russia. Moscow. 2005. Pp. 30–31. (rus)
19. Kuritsyn B.N., Postarnak D.A. Modeling of heat exchange in the installations of cylinder supply with liquefied gas. Materials of the International Scientific and Practical Conference «Cultural and Historical Heritage of Construction: yesterday, today, tomorrow» [Modelirovanie teploobmena v ustanovkakh ballonnogo snabzheniya szhizhennym gazom. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. «Kul'turno-istoricheskoe nasledie stroitel'stva: vchera, segodnya, zavtra»]. Saratov: SGAU, 2014. Pp. 69–72.
20. Bychkova I.M., Poberii A.A. On the determination of the heat transfer coefficient during heat

exchange of the neck of an underground reservoir with the surrounding soil mass [К определению коэффициента теплопередачи при теплообмене горловинной подземного резервуара с окружающим грунтовым массивом]. Resource and Energy Efficient Technologies in the Building Complex of the Region. Saratov. 2018. No. 9. Pp. 282–288. (rus)

21. Cristescu T. On a Class of Thermodynamic Process Involved in the Transport and Storage of Liquefied Petroleum Gas. Oil & Gas University of Ploiesti Bulletin. Technical Series. 2010. Vol. 62. No. 3B. Pp. 162–168.

22. Osipova N.N., Grishin B.M. Modeling of operating modes gas composite cylinders. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No. 3 (51). Pp. 63–74. DOI:10.36622/VSTU.2021.51.3.005

23. Osipova N.N., Kulyaev S.G., Orlova U.A. Evaporation capacity of liquefied petroleum gas composite vessels in natural regasification mode. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 272. Pp. 255–262. DOI:10.1007/978-981-16-8759-4_27.

24. Methodology for calculating the norms of liquefied hydrocarbon gas consumption by the population in the absence of gas meters: Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation № 340 dated of August 15, 2009 [Metodika rascheta norm potrebleniya szhizhennogo uglevodorodnogo gaza naseleniem pri otsutstvii priborov ucheta gaza: prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya RF ot 15 avgusta 2009 g. № 340]. Collection of Legislation of the Russian Federation. M., 2006. No. 25. Article. 2733. (rus)

Information about the authors

Osipova, Nataliya N. DSc, Assistant professor. E-mail: osnat75@mail.ru. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Russia, 410054, Saratov, st. Politechnicheskaya, 77.

Yakovlev, Dmitriy S. Postgraduate student. E-mail: dimon96@bk.ru. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Russia, 410054, Saratov, st. Politechnicheskaya, 77.

Received 26.01.2023

Для цитирования:

Осипова Н.Н., Яковлев Д.С. Разработка методических основ по эксплуатации композитных баллонов в коммунально-бытовом обеспечении потребителей газом // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 27–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37

For citation:

Osipova N.N., Yakovlev D.S. Development of methodological frameworks for the operation of composite cylinders in municipal gas supply to consumers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 27–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-27-37

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46

*Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЗДАНИЯ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. Применение искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения для анализа теплопотерь зданий представляет собой существенную актуальность в современном строительстве. Эти технологии обладают высокой точностью и эффективностью в обработке данных. Искусственные нейронные сети обладают способностью анализа обширных объемов информации и выделения сложных закономерностей, что значительно повышает точность определения теплопотерь в зданиях. В свою очередь, методы машинного обучения позволяют учитывать различные воздействующие факторы, такие как географическое положение и метеорологические условия, внося тем самым существенный вклад в повышение качества аналитических результатов. Такие подходы обеспечивают более достоверные и точные выводы, что является критически важным для эффективного управления энергопотреблением и сокращения тепловых потерь в зданиях. В данной статье авторами проведено исследование тепловых потерь зданий и их прогнозирование на этапе эксплуатации с использованием искусственных нейронных сетей и метода машинного обучения. Методика основана на анализе данных о теплопотерях и их связи с различными параметрами здания. Прогнозирование осуществлялось с использованием искусственных нейронных сетей в программном комплексе Statistica и методом машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn. Предлагаемый подход позволяет эффективно управлять энергопотреблением здания, оптимизируя его энергетическую эффективность и улучшая управление жизненным циклом объекта капитального строительства. Результаты демонстрируют высокую точность и сходимость модели с фактическими значениями, а также ее способность к предсказанию эффективности.

Ключевые слова: анализ данных, искусственные нейронные сети, оптимизация энергопотребления, прогнозирование, тепловые потери, управление жизненным циклом.

Введение. В современном строительстве управление жизненным циклом зданий становится ключевым аспектом, особенно в контексте энергоэффективности. Прогнозирование тепловых потерь на этапе эксплуатации зданий играет важную роль в оптимизации этого управления, что требует не только точного прогнозирования эффективности, но и использования передовых технологий, включая искусственные нейронные сети (ИНС).

Кладка стен из ячеистобетонных блоков представляет собой эффективный метод строительства наружных стен зданий в современной практике архитектуры и строительства. Отличительные черты данного материала, такие как высокие теплофизические характеристики и механическая прочность, открывают перед ним широкие перспективы применения [1–4].

Использование блоков из ячеистого бетона способствует повышению энергоэффективности зданий. Благодаря своей структуре, они обеспечивают высокий уровень теплоизоляции, что позволяет уменьшить теплопотери через стены и снизить энергозатраты на отопление и кондиционирование помещений. Это одно из ключевых

преимуществ, которое делает газобетон востребованным материалом для создания энергоэффективных зданий [5, 6].

Кроме того, блоки из ячеистого бетона отличаются долговечностью и надежностью. Их устойчивость к воздействию различных факторов, таких как влажность, температурные колебания и механические нагрузки, гарантирует длительный срок службы здания, обеспечивая его стабильность и сохранность конструкции на протяжении многих лет эксплуатации [7].

Современные исследования в области строительства активно используют передовые методы анализа для прогнозирования тепловых потерь через стены из газобетона. ИНС становятся важным инструментом в этом процессе, позволяя улучшить точность прогнозов за счет уникальных характеристик и теплоизоляционных свойств этого строительного материала. Такие современные подходы в анализе данных способствуют оптимизации энергетической эффективности зданий, построенных из газобетона.

В вариационном ряде выделяют две основные категории признаков: средние значения и меры вариации (или рассеяния) [8–10]. Среднее арифметическое представляет собой количественную характеристику однородной группы

данных, определяя обобщенные размеры количественных признаков. Основными показателями средних значений являются среднее арифметическое, мода и медиана.

Среднее арифметическое (x) вычисляется по формуле:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

где x_i – значения признака с порядковым номером i ($i = 1, n$); n – объем данных.

Мода (Mo) – это значение, которое наиболее часто встречается в наборе данных. Медиана (Me) представляет собой значение, расположенное посередине вариационного ряда. Для нечетного числа вариантов ($n = 2m + 1$) это значение будет таким: x_{m+1} , для четного ($n = 2m$) – среднее между x_m и x_{m+1} .

Медиана широко применяется при анализе неравномерных распределений данных и менее чувствительна к выбросам по сравнению со средним арифметическим. Это делает ее более достоверной мерой центральной тенденции в данных, особенно в случае ассиметричных распределений.

Хотя средние значения дают общую картину о статистической группе, они не отражают, насколько точно они описывают это собрание данных.

Для измерения вариации значений признака используются другие показатели: размах вариации, дисперсия и среднее квадратичное отклонение.

Размах вариации (R) определяется как разница между максимальным (x_{max}) и минимальным (x_{min}) значениями признака по формуле:

$$R = x_{max} - x_{min}, \quad (2)$$

Другие метрики, такие как дисперсия (σ^2) и среднее квадратичное отклонение (σ), вычисляются на основе отклонений всех значений признака от его среднего значения. Дисперсия измеряет абсолютный разброс значений относительно среднего значения, представляя средний квадрат отклонений. Среднее квадратичное отклонение выражает меру вариации в тех же единицах, что и сам признак, и представляет собой корень из дисперсии

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (3)$$

где x_i – варианта с порядковым номером i ; \bar{x} – средняя арифметическая; n – объем совокупности.

При сравнении вариации признака между группами объектов или внутри одной группы в

разные периоды, полезны относительные показатели, такие как коэффициент вариации. Он представляет отношение среднее квадратичное отклонения к средней арифметической, выраженное в процентах:

$$V = \frac{\sigma}{x} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Форма распределения данных, соответствующая нормальному распределению, определяется двумя параметрами: средним значением x и стандартным отклонением σ . Уравнение, описывающее кривую нормального распределения, представлено следующим образом:

$$y = \frac{e^{-\frac{t^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}, \quad (5)$$

где t – нормализованное отклонение данных от среднего значения.

Основное свойство кривой нормального распределения заключается в том, что расстояние на горизонтальной оси распределения, измеренное в единицах стандартного отклонения от среднего значения, всегда остается постоянным. Это позволяет оценить долю данных в генеральной совокупности с соответствующими параметрами (рис. 1) [8].

Также в качестве инструмента для анализа для прогнозирования тепловых потерь через стены из газобетона возможно использование модели машинного обучения, например, на основе библиотеки scikit-learn, как наиболее доступная для использования и вариации исходных факторов. Scikit-learn – это библиотека машинного обучения для языка программирования Python. Модель машинного обучения, использующая библиотеку scikit-learn, проходит через несколько ключевых этапов. Первым шагом является выбор подходящей модели, что зависит от конкретного типа задачи, будь то классификация или регрессия, а также от особенностей данных. Scikit-learn предоставляет широкий спектр алгоритмов, включая Support Vector Machines, Random Forest, Decision Trees и другие [11–13].

Второй этап – подготовка данных. В этом контексте необходимо обеспечить, чтобы данные были представлены в формате, наиболее подходящем для обучения модели. Это может включать в себя масштабирование, кодирование категориальных переменных и обработку пропущенных значений.

После этого происходит обучение модели на тренировочных данных. С использованием методов, предоставляемых scikit-learn, модель приспособляется к данным и настраивает свои параметры.

Затем модель тестируется на отложенных тестовых данных для оценки ее производительности и обобщающей способности. В случае необходимости можно произвести настройку гиперпараметров для улучшения результатов [14, 15].

Наконец, обученная модель готова к использованию для прогнозирования или классификации новых данных в соответствии с задачей, для которой она была разработана.

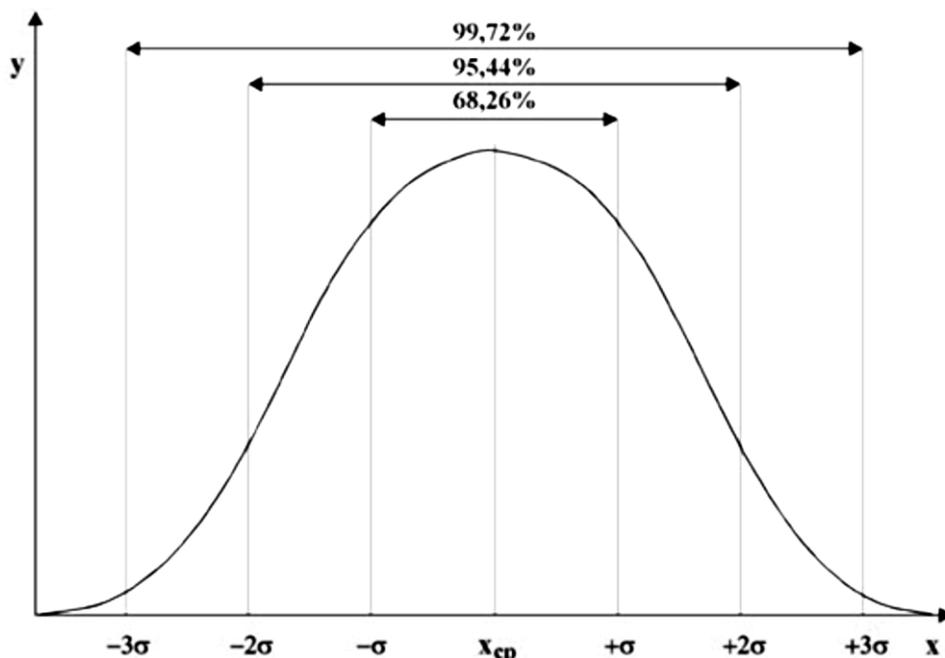


Рис. 1. Вид кривой нормального распределения

Материалы и методы. В рамках исследования проведено прогнозирование тепловых потерь здания с наружными стенами из газобетонных блоков площадью 18 м² с использованием ИНС для г. Белгород (Россия). Прогнозирование осуществлялось с использованием ИНС в программном комплексе Statistica. В качестве исходных данных были приняты следующие показатели: теплопроводность конструкции – 0,141 Вт/(м·°С); приведенное сопротивление теплопередаче конструкции – 1,897 (м·°С)/Вт; толщина стены – 300 мм; ориентация конструкции – север-

ная. Тепловые потери через ограждающие конструкции определяются исходя из температуры наружного воздуха (рис. 2) по формуле:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot (T_{вн} - T_{нар})}{d}, \quad (6)$$

где Q – количество тепла, проходящего через стену за определенное время, Вт; k – коэффициент теплопроводности материала стены, Вт/(м²·°С); A – площадь стены, м²; $T_{вн}$ – температура внутренней поверхности стены, °С; $T_{нар}$ – температура наружной поверхности стены, °С; d – толщина стены.

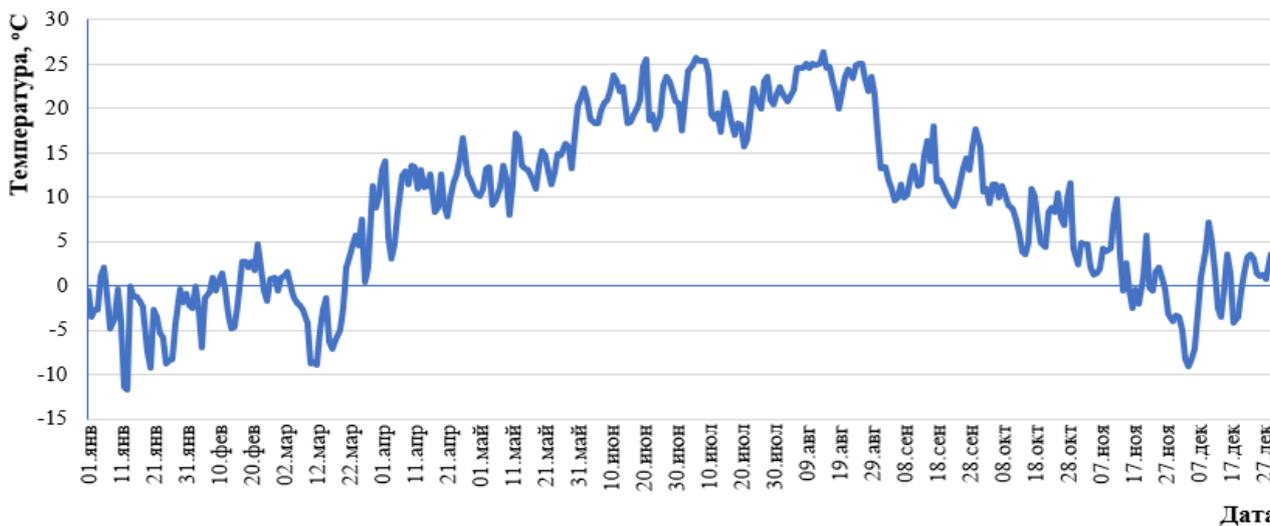


Рис. 2. Температура наружного воздуха в г. Белгород (2022 г.)

В качестве модели машинного обучения использовалась модель на основе библиотеки `scikit-learn`, элементы которой представлены в табл. 1.

Основная часть. При обучении ИНС использовался метод многократных подвыборок с 5 нейронными сетями при построении (рис. 3, а). Число нейронов на внутреннем слое сети было принято от 10 до 25 (табл. 2), циклов построения – 2 000 (рис. 3, б).

Анализируя ошибки и производительности на выборках для полученного набора сетей (табл. 2), делаем вывод, что из всей выборки на тесте

для города Белгорода наиболее оптимальной является сеть 13 с 15 нейронами на внутреннем слое сети с наименьшей ошибкой на тренировке (0,990) и на тесте (0,897).

Правильность выбора данных сетей подтверждается высокой сходимостью с фактическими значениями на графике прогнозов временных рядов для данной сети как с выборкой тренировки, теста, валидации (рис. 4), где синим цветом – фактические значения, красным – данные, прогнозируемые сетью.

Таблица 1

Элементы модели машинного обучения на основе библиотеки `scikit-learn`

Назначение	Элемент модели
	<pre>from sklearn.model_selection import train_test_split from sklearn.linear_model import LinearRegression from sklearn.metrics import mean_squared_error import pandas as pd</pre>
Загрузка данных из отдельных файлов CSV для каждого показателя	<pre>'Теплопроводность_конструкции': 'путь_к_файлу_теплопроводность.csv', 'Приведенное_сопротивление_теплопередаче': 'путь_к_файлу_сопротивление.csv', 'Теплопотери_через_ограждающие_конструкции': 'путь_к_файлу_теплопотери.csv', 'Дополнительные_удельные_потери_теплоты_через_стык_j-го_вида': 'путь_к_файлу_потери_через_стык.csv', 'Ориентация_конструкции': 'путь_к_файлу_ориентация.csv', 'Температура_воздуха': 'путь_к_файлу_температура.csv', 'Относительная_влажность': 'путь_к_файлу_влажность.csv',</pre>
Замена названия ключей на фактические названия показателей	<pre>file_paths = { }</pre>
Считывание данных из каждого файла CSV	<pre>data = {} for key, file_path in file_paths.items(): data[key] = pd.read_csv(file_path)</pre>
Объединение данных в один DataFrame по общему идентификатору	<pre>merged_data = data['Теплопроводность_конструкции'] for key in file_paths.keys(): if key != 'Теплопроводность_конструкции': merged_data = pd.merge(merged_data, data[key], on='ID')</pre>
Разделение на признаки и целевую переменную	<pre>X = merged_data.drop('Тепловые_потери_через_ограждающие_конструкции', axis=1) y = merged_data['Тепловые_потери_через_ограждающие_конструкции']</pre>
Создание обучающего и тестового наборов данных	<pre>X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)</pre>
Создание и обучение модели линейной регрессии	<pre>model = LinearRegression() model.fit(X_train, y_train)</pre>
Предсказание на тестовом наборе данных	<pre>y_pred = model.predict(X_test)</pre>
Оценка качества модели	<pre>mse = mean_squared_error(y_test, y_pred) print(f"Среднеквадратичная ошибка: {mse}")</pre>
Использование модели для прогнозирования тепловых потерь для новых данных	<pre>new_data = { 'новый набор данных' }</pre>
	<pre>new_df = pd.DataFrame(new_data) predicted_heat_losses = model.predict(new_df) print(f"Прогноз тепловых потерь для конструкции: {predicted_heat_losses[0]}")</pre>

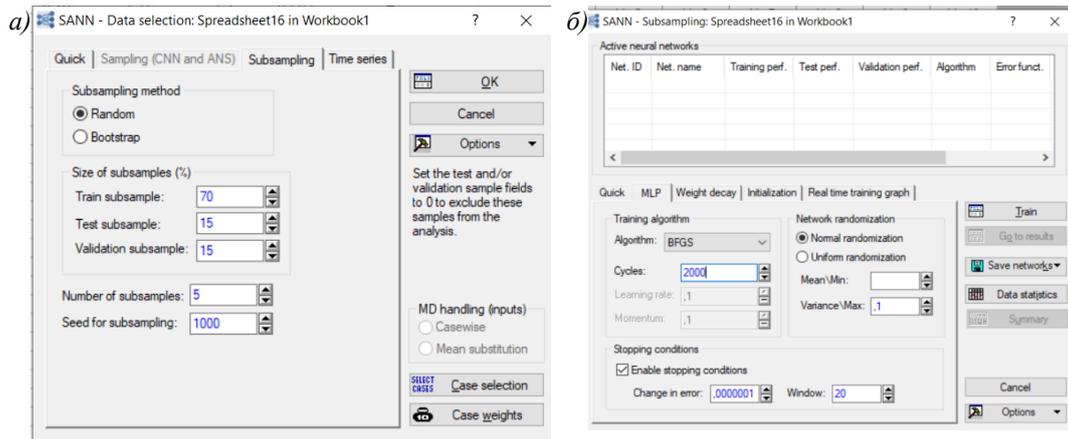


Рис. 3. Создание подвыборки: а – задание количества нейронных сетей при построении; б – задание количества циклов построения

Таблица 2

Результаты обучения нейронных сетей

Индекс	Имя	Ошибка на тренировке	Ошибка на тесте	Ошибка на валидации
1	MLP 168-25-1	0,975309	0,939692	0,916330
2	MLP 168-25-1	0,974771	0,909163	0,917442
3	MLP 168-25-1	0,992309	0,896421	0,849101
4	MLP 168-25-1	0,967524	0,910456	0,920615
5	MLP 168-25-1	0,976584	0,919458	0,870481
6	MLP 168-20-1	0,954770	0,938841	0,919451
7	MLP 168-20-1	0,977932	0,904333	0,907534
8	MLP 168-20-1	0,988593	0,896304	0,883655
9	MLP 168-20-1	0,981821	0,906755	0,903165
10	MLP 168-20-1	0,979376	0,930609	0,879652
11	MLP 168-15-1	0,960189	0,935911	0,921713
12	MLP 168-15-1	0,976658	0,906108	0,913985
13	MLP 168-15-1	0,990239	0,897884	0,879350
14	MLP 168-15-1	0,969767	0,911645	0,916526
15	MLP 168-15-1	0,979235	0,925683	0,894693
16	MLP 168-10-1	0,950672	0,940617	0,914498
17	MLP 168-10-1	0,936904	0,902839	0,908218
18	MLP 168-10-1	0,988885	0,898756	0,875421
19	MLP 168-10-1	0,980602	0,906507	0,923584
20	MLP 168-10-1	0,978299	0,915976	0,860043

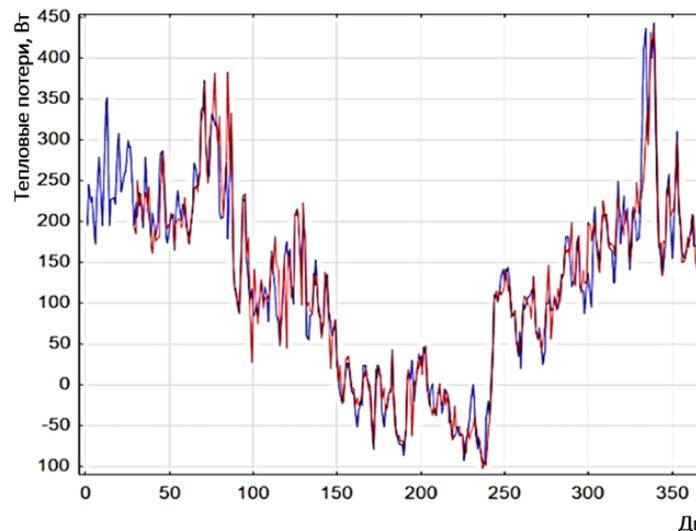


Рис. 4. График прогнозов временных рядов для сети с выборкой тренировки, теста и валидации

Гистограмма остатков (рис. 5) соответствует нормальному закону распределения Гаусса – Лапласа с пиком в центре и относительно симметричными боковыми сторонами (рис. 1).

Фактическая функция соответствует прогнозной, что подтверждается высокой плотностью точек на прямой (рис. 6). Полученная регрессионная модель допускает ошибку около 1,22%.

Результат обучения модели машинного обучения представлен на рис. 7. После применения модели машинного обучения получено низкое значение среднеквадратичной ошибки (до 1,8), что указывает на высокую точность модели в предсказании энергоэффективности конструкций.

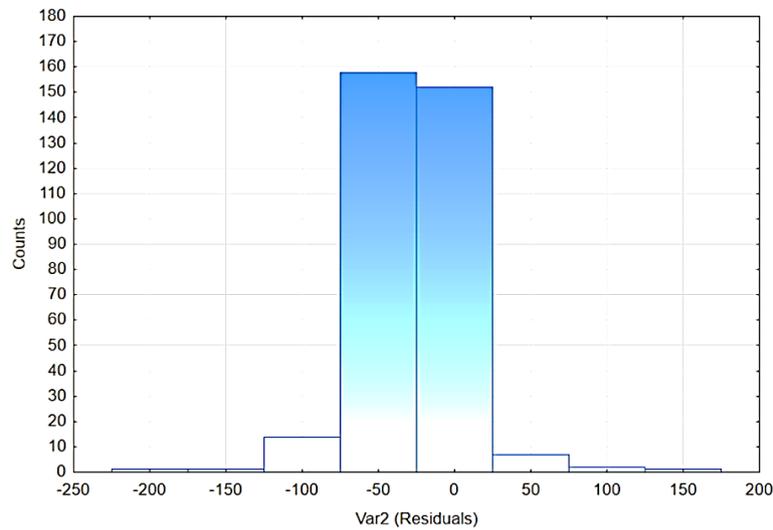


Рис. 5. Гистограмма остатков временного ряда с выборкой тренировки, теста и валидации

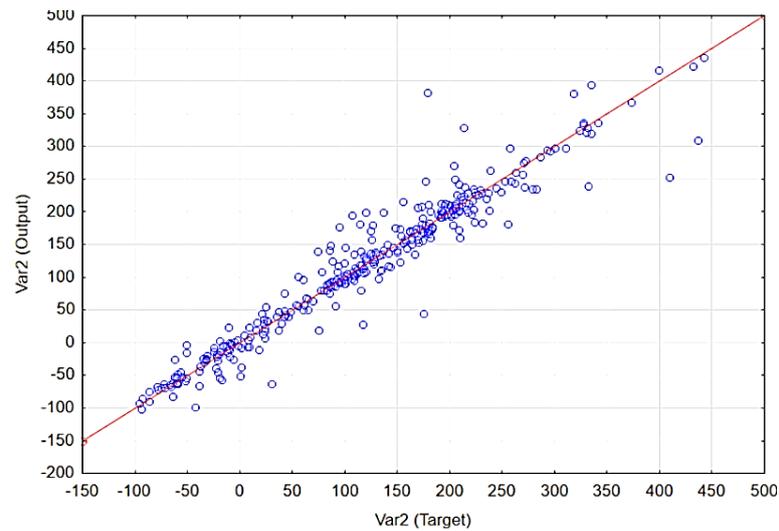


Рис. 6. Диаграмма рассеяния для сети с выборкой тренировки, теста и валидации

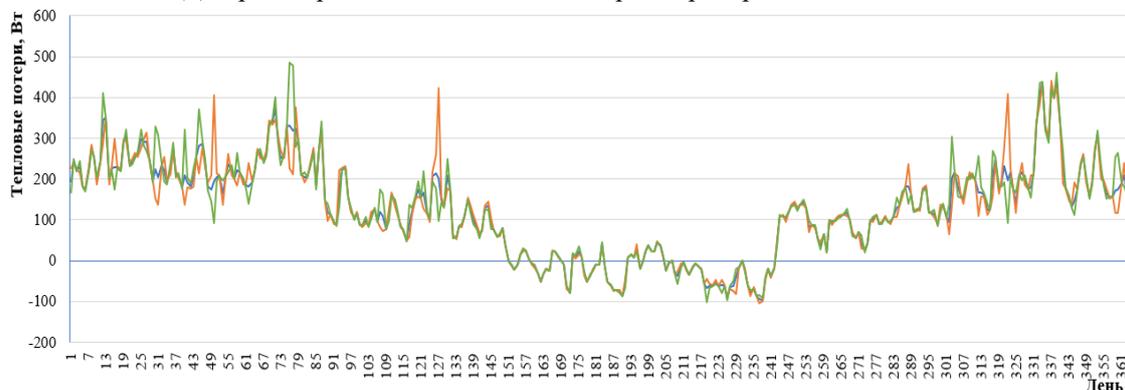


Рис. 7. График предсказания модели машинного обучения и ИНС для данных по г. Белгород: — расчетные значения; — прогноз ИНС; — прогноз машинного обучения

Кроме того, результаты предсказаний логически сходятся с известными факторами влияния на энергоэффективность, такими как климатические условия и другие показатели, что также подтверждается большой сходимостью результатов с нейросетевым прогнозированием.

Выводы. Таким образом, исследования показали, что использование нейросетевых моделей способствует улучшению точности прогнозов и оптимизации энергетической эффективности зданий, возведенных из газобетонных материалов. Использование ИНС позволяет более точно предсказывать тепловые потери через такие стены, что существенно важно для улучшения управления энергопотреблением зданий в различных климатических условиях.

Нейросетевые технологии демонстрируют свою эффективность не только в обеспечении точности прогнозов, но и в способности адаптироваться к изменяющимся условиям и динамике процессов. Этот подход не только содействует оперативному управлению ресурсами и оборудованием, но и обеспечивает более долгосрочное и устойчивое функционирование объектов. Таким образом, внедрение и использование искусственных нейронных сетей в прогнозировании на стадии эксплуатации становится ключевым аспектом повышения эффективности инженерного управления в области капитального строительства.

Использование модели машинного обучения на основе библиотеки scikit-learn для определения теплопотерь здания представляет высокую актуальность в свете нескольких существенных преимуществ этого подхода. Прежде всего, модели, построенные с использованием данной библиотеки, обладают высокой точностью и способностью обобщения, что особенно ценно в контексте сложных взаимосвязей и закономерностей, характерных для анализа теплопотерь зданий.

Таким образом, использование модели машинного обучения на основе scikit-learn выгодно благодаря ее точности, гибкости в выборе моделей и эффективности обработки данных, что подтверждается высокой сходимостью данных с расчетными показателями.

В заключение следует подчеркнуть, что использование ИНС на стадии эксплуатации объекта капитального строительства открывает новые возможности для управления жизненным циклом проекта. Нейросетевые технологии и модели машинного обучения позволяют спрогнозировать результаты организационно-технологических и конструктивных решений, принятых на стадии проектирования и возведения, уменьшая вероятность человеческих ошибок и оптимизируя использование ресурсов. Эксплуатация

объектов капитального строительства с применением искусственных нейронных сетей и методов машинного обучения становится ключевым фактором в повышении конкурентоспособности проектов и обеспечении их успешного функционирования в долгосрочной перспективе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Grinfeld G.I. Performance Characteristics of Autoclaved Aerated Concrete with Density 400 kg/cub.m // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. No. 5(10). Pp. 28–57.
2. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Кондрашев К.Р., Сулейманов К.А., Пириев Ю.С. Энергосберегающие газобетоны на композиционных вяжущих // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 4. С. 73–83.
3. Сулейманова Л.А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 2. С. 69–76.
4. Peng P.F., Qin X.M., Wu Y.S. Performance Study on Masonries of Different Aerated Concrete Blocks // *Key Engineering Materials*. 2014. No. 633. Pp. 299–302. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.633.299>
5. Harmati N., Jakšić Ž., Vatin N. Energy consumption modelling via heat balance method for energy performance of a building // In: *Procedia Engineering*. 2015. Pp. 786–794. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.238
6. Stritih U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Buildings // *Energy and Buildings*. 2003. No. 35(11). Pp. 1097–1104. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.07.001
7. Girault M., Petit D. Identification methods in nonlinear heat conduction. Part II: inverse problem using a reduced model // *Int. Journal of Heat and Mass*. 2005. No. 48(1). Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.033
8. Богданова Р.А., Казазаева П.И. Первичная оценка статистических данных в программе STATISTICA // *Информация и образование: границы коммуникаций*. 2022. № 14(22). С. 157–162.
9. Камашев В.В., Кучерова Е.А., Раскин П.Н. Выбор оптимальных настроек нейронной сети при прогнозировании временного ряда в пакете статистика // *Молодежь. Наука. Современность: IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, Воткинск*. 2017. С. 107–109.
10. Клемина В.И. Софинская Е.Н., Зироян А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование на примере программы // *Человеческий капитал*. 2015. № 2(74). С. 66–74.

11. Deo T.Y., Sanju A. Data imputation and comparison of custom ensemble models with existing libraries like XGBoost, CATBoost, AdaBoost and Scikit learn for predictive equipment failure // *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 72(3). Pp. 1596–1604. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.410.

12. Qu C., Houston P.L., Yu Q., Pandey P., Conte R., Nandi A., Bowman J.M. Machine learning software to learn negligible elements of the Hamiltonian matrix // *Artificial Intelligence Chemistry*. 2023. Vol. 1(2). 100025. DOI: 10.1016/j.aichem.2023.100025.

13. Qu, C., Houston, P.L., Yu, Q., Conte, R., Pandey, P., Nandi, A., Bowman, J.M. Machine learning classification can significantly reduce the cost of

calculating the Hamiltonian matrix in CI calculations // *The Journal of Chemical Physics*. 2023. 159(7). 1. DOI: 10.1063/5.0168590

14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer Series in Statistics: Springer New York. 2009. Vol. 2. 758 p. DOI: 10.1007/BF02985802.

15. Ma Sh., He B., Ge X., Luo X. Spatial prediction of soil salinity based on the Google Earth Engine platform with multitemporal synthetic remote sensing images // *Ecological Informatics*. 2023. Vol. 75. 102111. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102111.

Информация об авторах

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

Обайди Адхам Абдулсаттар Хамид, исследователь кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: Adkhem@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.01.2024 г.

© Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х., 2024

***Suleymanova L.A., Adham A.H.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: kloud09@mail.ru*

BUILDING LIFE CYCLE MANAGEMENT AT THE OPERATION STAGE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELS AND MACHINE LEARNING

Abstract. *The use of artificial neural networks and machine learning methods for the analysis of heat loss in buildings is of significant relevance in modern construction. These technologies are highly accurate and efficient in data processing. Artificial neural networks have the ability to analyze vast amounts of information and identify complex patterns, which significantly increases the accuracy of determining heat loss in buildings. In turn, machine learning methods make it possible to take into account various influencing factors, such as geographic location and meteorological conditions, thereby making a significant contribution to improving the quality of analytical results. Such approaches provide more reliable and accurate conclusions, which is critical for effective energy management and reducing heat loss in buildings. In this article, the authors conducted a study of heat losses of buildings and their prediction at the operational stage using artificial neural networks and machine learning methods. The technique is based on the analysis of data on heat loss and their relationship with various building parameters. Forecasting was carried out using artificial neural networks in the Statistica software package and the machine learning method based on the scikit-learn library. The proposed approach allows you to effectively manage the energy consumption of a building, optimizing its energy efficiency and improving the life cycle management of a capital construction project. The results demonstrate the high accuracy and convergence of the model with actual values, as well as its ability to predict performance.*

Keywords: *data analysis, artificial neural networks, energy consumption optimization, forecasting, heat losses, life cycle management.*

REFERENCES

1. Grinfeld G.I. Performance Characteristics of Autoclaved Aerated Concrete with Density 400 kg/cub.m. Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. No. 5(10). Pp. 28–57.

2. Suleymanova L.A., Pogorelova I.A., Kondrashev K.R., Suleymanov K.A., Piriev Yu.S. Energy-saving aerated concrete with composite binders [Energoberegayushchie gazobetonny na kompozitsionnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 73–83. (rus)

3. Suleymanova L.A. Control of the process of formation of the porous structure of cellular concrete [Upravlenie processom formirovaniya poristoj struktury yacheistyh betonov]. Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhov. 2016. No. 2. Pp. 69–76. (rus)
4. Peng P.F., Qin X.M., Wu Y.S. Performance Study on Masonries of Different Aerated Concrete Blocks. Key Engineering Materials. 2014. No. 633. Pp. 299–302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.633.299
5. Harmati N., Jakšić Ž., Vatin N. Energy consumption modeling via heat balance method for energy performance of a building. In: Procedia Engineering. 2015. Pp. 786–794. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.238
6. Stritih U. Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Buildings. Energy and Buildings. 2003. No. 35(11). Pp. 1097–1104. DOI: 10.1016/j.enbuild.2003.07.001
7. Girault M., Petit D. Identification methods in nonlinear heat conduction. Part II: inverse problem using a reduced model. Int. Journal of Heat and Mass. 2005. No. 48(1). Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.033
8. Bogdanova R.A., Kazazaeva P.I. Primary assessment of statistical data in the STATISTICA program [Pervichnaya ocenka statisticheskikh dannyh v programme STATISTICA]. Information and education: boundaries of communications. 2022. No. 14(22). Pp. 157–162. (rus)
9. Kamashev V.V., Kucherova E.A., Raskin P.N. Selection of optimal settings for a neural network when forecasting a time series in the statistics package [Vybor optimal'nyh nastroek nejronnoj seti pri prognozirovanii vremennogo ryada v pakete statistika]. Youth. The science. Modernity: IV All-Russian scientific and practical conference with international participation, Votkinsk. 2017. Pp. 107–109. (rus)
10. Klenina V.I. Sofinskaya E.N., Ziroyan A.A. Time series analysis and forecasting using the example of a program [Analiz vremennyh ryadov i prognozirovanie na primere programmy]. Human capital. 2015. No. 2(74). Pp. 66–74.
11. Deo T.Y., Sanju A. Data imputation and comparison of custom ensemble models with existing libraries like XGBoost, CATBoost, AdaBoost and Scikit learn for predictive equipment failure. Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 72(3). Pp. 1596–1604. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.410.
12. Qu C., Houston P.L., Yu Q., Pandey P., Conte R., Nandi A., Bowman J.M. Machine learning software to learn negligible elements of the Hamiltonian matrix. Artificial Intelligence Chemistry. 2023. Vol. 1(2). 100025. DOI: 10.1016/j.aichem.2023.100025.
13. Qu C., Houston P.L., Yu Q., Conte R., Pandey P., Nandi A., Bowman J.M. Machine learning classification can significantly reduce the cost of calculating the Hamiltonian matrix in CI calculations. The Journal of Chemical Physics. 2023. 159(7). 1. DOI: 10.1063/5.0168590
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.H. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer Series in Statistics: Springer New York. 2009. Vol. 2. 758 p. DOI: 10.1007/BF02985802.
15. Ma Sh., He B., Ge X., Luo X. Spatial prediction of soil salinity based on the Google Earth Engine platform with multitemporal synthetic remote sensing images. Ecological Informatics. 2023. Vol. 75. 102111. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102111.

Information about the authors

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.

Obaidi Adham Abdulsattar Hameed. Researcher, Department of Civil Engineering and Urban Development. E-mail: Adkhem@mail.ru. Belgorod State Technological University V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 19.01.2024

Для цитирования:

Сулейманова Л.А., Обайди А.А.Х. Управление жизненным циклом здания на этапе эксплуатации с использованием моделей искусственных нейронных сетей и машинного обучения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46

For citation:

Suleymanova L.A., Adham A.H. Building life cycle management at the operation stage using artificial neural network models and machine learning. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 38–46. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-38-46

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-47-55

Дубино А.М.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: anastuzi@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СПЕЦИФИКИ КОНТЕКСТА НА УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ

Аннотация. Новые концепции управления водными ресурсами в городском планировании, касающиеся разделения потоков сточных вод и использования сточных вод в качестве ресурса, уже существуют, но недостаточное изучение контекста при внедрении данных концепций может снизить их эффективность. Вместо того, чтобы рассматривать использование технологий водосберегающего проектирования как основополагающую концепцию конечного состояния городской среды, в данном исследовании рассматривается гипотеза о том, что водосбережение – это переменная, которая зависит от контекста и других переменных на исследуемой территории. Данная гипотеза была исследована с помощью анализа зарубежной и отечественной научной литературы, а также практических материалов международных организаций. Для изучения особенностей управления водными ресурсами был применен комплексный подход, что в итоге позволило сделать выводы о том, что учет контекста при внедрении технологий водосбережения в крупном городе способствует эффективному формированию пространственной планировки и созданию качественной городской среды. Сформулирована теоретическая основа концепции перехода к модели города с развитыми технологиями водосбережения. Рассмотрены примеры зарубежных и отечественных проектов, направленные на внедрение технологий водосберегающего проектирования в более широком диапазоне контекстов. Сделаны выводы о том, что понимание контекста помогает градостроителям выявлять возможности среди противоречий в городской среде, что в будущем положительно повлияет на включение водных ресурсов в программы местного городского планирования и тем самым облегчит выход за пределы гипотетических уровней и абстрактности концепции.

Ключевые слова: управление водными ресурсами, WSUD, городской контекст, крупный город, городская среда, изменение климата.

Введение. Городская среда во всем мире сталкивается с проблемами из-за ускоряющегося роста городского населения. Ожидается, что к 2050 году 68 % населения земного шара будет проживать в городских районах. Из этой доли только 8,5 % будут жить в хорошо развитых мегаполисах с населением 10 миллионов человек или более, тогда как примерно половина будет проживать в относительно небольших и менее исследованных городских поселениях вторичного характера – крупных городах [1]. Это по-прежнему означает, что процент мирового населения, населяющего мегаполисы, увеличится больше всего, но также это говорит о том, что абсолютный прирост населения, а также скорость и масштабы связанных с этим социально-экономических изменений являются наибольшими и наиболее насущными в крупных городах, что делает коллективное воздействие крупных городов на окружающую среду значительным, в какой-то степени ввиду менее выгодных начальных условий и отсутствия инфраструктуры под растущим давлением быстрой урбанизации без обширного городского планирования [2]. Городские районы по всему миру также сталкиваются с климатическим кризисом – более длительными, нерегулярными и непредсказуемыми периодами экстремальных осадков или жары, приводящих к таким

опасностям, как засухи, наводнения и оползни. Однако воздействие климатического кризиса, возможно, также обусловлено изменениями почвенного покрова, вызванными урбанизацией, и последующими перерывами в гидрологическом цикле. В городских районах последствия этих изменений наиболее сильно сказываются на жизни людей. При быстрой урбанизации в крупных городах эти изменения происходят быстро. Помимо негативного влияния на человека и гидрологические системы, климатические изменения также затрагивают наземные и морские экосистемы; многочисленные виды флоры и фауны подвергаются повышенному риску исчезновения, что, в свою очередь, влияет на городскую и природную среду [3].

Прогнозы роста городов, иногда в сочетании с частично неконтролируемым распределением и климатическими нагрузками, создают проблемы смягчения последствий и адаптации в городах для специалистов по городскому управлению водными ресурсами и городскому дизайну, планированию и принятию решений [4]. Динамичный характер крупных городов также предоставляет возможности для пересмотра пространственной организации и систем управления водными ресурсами в городской среде, например, для содействия сохранению окружающей среды

и созданию многофункциональной инфраструктуры.

Перед лицом растущих проблем в предоставлении услуг водоснабжения широко обсуждается смена парадигмы в области управления водными ресурсами. Этот сдвиг предполагает преодоление ограничений, выявленных в результате преобладающего до сих пор линейного и централизованного подхода к водоснабжению и сбросу сточных вод путем дополнения его комплексными подходами к управлению городскими источниками и системами водоснабжения. Этот сдвиг зависит не только от технических изменений в инфраструктуре водных систем, но и от институциональных, социально-политических адаптаций [5].

Городское планирование с учетом водных ресурсов (WSUD) – это концепция управления водным циклом в застроенной среде посредством городского планирования и дизайна [6]. В контексте городов Европы и Австралии эта концепция имеет «послужной список» успешного внедрения и считается пригодной для решения городских проблем и проблем с водоснабжением, эффективно обеспечивая многочисленные преимущества и качества [7]. Растущее географическое распространение применения WSUD указывает на его пригодность в широком диапазоне климатических условий [8, 9].

WSUD предлагает подход к альтернативной пространственной организации городов и инфраструктур, отвечающий городским и климатическим проблемам. Однако вместо того, чтобы рассматривать использование технологий водосберегающего проектирования как основополагающую концепцию конечного состояния городской среды, в данном исследовании рассматривается теория о том, что водосбережение – это переменная, которая зависит от контекста и других переменных на исследуемой территории. Таким образом, водосбережение выступает связующим звеном между контекстом и концепцией, где контекст формирует концепцию, а концепция обеспечивает фокус на том, как учитывать контекст. Поэтому грамотное внедрение «синей» инфраструктуры означает вдумчивое прочтение контекста, подчеркивающее, в какой степени городские условия, характерные для конкретного участка, могут быть определены как водосберегающие. Это понимание позволяет местной администрации, градостроителям, дизайнерам и инженерам адаптировать методы водосберегающего проектирования WSUD к культурному, социально-экономическому и физическому контексту и участвовать в нем.

В отечественной градостроительной науке существует внушительная теоретическая база

для дальнейшего развития концепции водосберегающего проектирования в современном городе. Вопросы противоречивости городского развития в своих трудах поднимали такие зарубежные градостроители, как Дж. Форестер, К. Линч, Г. Эдельман, С. Боэри. Отечественные градостроители также рассматривали проблемы пространственных конфликтов: Л. Коган, А. Крашенинников [10], В. Глазычев [11], А.В. Нефедов [12, 13], Е.О. Фрейдин. В области ландшафтной архитектуры и геопластики внесли большой вклад труды: З.А. Николаевской, А.П. Вергунова [14, 15], Е.М. Микулиной, А.Г. Большакова [16, 17], В.А. Горохова [15]. Проблемы водосбережения описываются в научных работах МАРХИ и МГСУ. Садковская О.Е. рассматривает внедрение водосберегающих планировочных приемов при экореконструкции малых и средних городов Ростовской области [18]. Однако инструменты водосберегающего проектирования и принципы его внедрения в городскую среду крупных городов в отечественной градостроительной науке и практическом проектировании остаются малоизученными.

Объектом данного исследования является управление водными ресурсами в крупном городе. Цель исследования – изучение перспектив внедрения технологий водосбережения в различных контекстах с учётом современных мировых тенденций. К задачам данного исследования относятся: определение роли управления водными ресурсами в городском планировании, выявление фундаментальных характеристик концепции водосбережения в крупном городе и анализ мирового и отечественного опыта использования технологий водосбережения в различных контекстах.

Материалы и методы. Для изучения влияния контекста на управление водными ресурсами были использованы материалы трудов отечественных и зарубежных учёных, практические материалы международных организаций (Международная водная ассоциация (International Water Association, IWA), Всемирный банк (World Bank), Организация Объединённых Наций (United Nations, UN), Программа Организации Объединённых Наций по окружающей среде (UNEP-DHI); Глобальное водное партнерство (Global Water Partnership, GWP), а также документы нормативной базы РФ в сфере строительства (Градостроительный кодекс РФ, Водный кодекс РФ, Территориальные строительные нормы). Для изучения особенностей управления водными ресурсами на территории крупного города был использован комплексный подход, который включил в себя:

– исследование междисциплинарного аспекта в концепции городского планирования с учетом водных ресурсов;

– выявление фундаментальных характеристик концепции водосбережения в крупном городе;

– анализ гидрологических особенностей территории, создающих контекст для внедрения водосберегающих технологий;

– анализ и обобщение существующего отечественного и зарубежного опыта внедрения водосберегающих технологий в различных контекстах.

Руководствуясь целью, способствовать продолжению успешно начатого сдвига парадигмы в контексте крупных городов, в данном исследовании подчеркивается, как концепция WSUD может потребовать особой интерпретации и практической реализации в зависимости от контекста. Таким образом, статья фокусируется на изменении положения понятия управления водными ресурсами и переоценке высококонкурентного городского дизайна в рамках WSUD. Размышления об управлении водными ресурсами с точки зрения городского дизайна могут помочь внедрить WSUD в практику городского проектирования и, что более важно, обеспечить применение технологий водосберегающего проектирования в более широком диапазоне контекстов, учитывая любой набор местных начальных условий, динамики, сложностей и средств.

Основная часть. Городское планирование с учетом водных ресурсов (WSUD) предлагает объединить управление водным циклом и внедрить его в практику городского проектирования и планирования, а также расставить приоритеты в отношении воды в учреждениях городского проектирования и планирования. Внедрение учета водных ресурсов в процесс городского проектирования требует реализации междисциплинарного и коллективного характера городского проектирования для интеграции:

1) инженерных, экологических и социальных дисциплин;

2) управления водоснабжением, канализацией и ливневым стоком;

3) управления водными ресурсами в построенную форму (архитектуру зданий, ландшафтную архитектуру, урбанизм);

4) различных масштабов исследований и вмешательств, начиная от зданий, внутренних дворов и профилей улиц, заканчивая целостными водосборными бассейнами;

5) структурных и неструктурных инициатив, начиная от политики и заканчивая инфраструктурой.

Таким образом, концепция WSUD поддерживает городское развитие с интегрированным управлением водными ресурсами в качестве междисциплинарного усилия по минимизации негативного гидрологического воздействия на окружающую среду.

Вместо того, чтобы рассматривать существующие примеры реализации WSUD как типовые и эффективные в определенных контекстах, данное исследование направлено на выявление взаимосвязи между тремя столпами пространственного проявления WSUD: *водосберегающими технологиями, городским дизайном и спецификой внедрения*. Вопреки одному видению города будущего, в котором управление водными ресурсами представлено как конечное и наиболее перспективное состояние городской среды, в данном исследовании подчеркивается, что водосбережение в первую очередь является дополнением, основанным на наборе прошлых и настоящих характеристик участка и прошлых, нынешних и будущих результатов городского проектирования [19]. Это подразумевает то, что управление водными ресурсами – это контекстная переменная, зависящая от конкретного участка, диктуемая и ограниченная набором других переменных участка, характеризующих контекст (рис. 1). Это переводит управление водными ресурсами из конечной цели в инструмент, являющийся частью текущего контекста и культуры и изменяющийся в зависимости от местоположения и гидрологических условий по отношению к местному климату (изменчивость климата), топографии (разнообразие конфигураций водоразделов и склонов и их взаимосвязь), почвы (состав конкретных типов почв, их гидравлические свойства и пропускная способность), экологии (разнообразие и характеристики растительности, фрагментация и неоднородность ландшафта суши и сопутствующих экосистемных услуг), а также городского характера (землепользование и растительный покров, уникальная пространственная морфология, плотность, состояние, функционирование и управление объектами и системами, а также темпы их расширения). Уникальная совокупность этих элементов создает контекст и регулирует большинство гидрологических процессов. Их локальные различия приводят к кратковременным или многолетним явлениям засухи или затопления, застою воды в водотоках или внезапным наводнениям, подчеркивая, как контекст определяет гидрологические процессы и, следовательно, степень потенциала управления водными ресурсами.

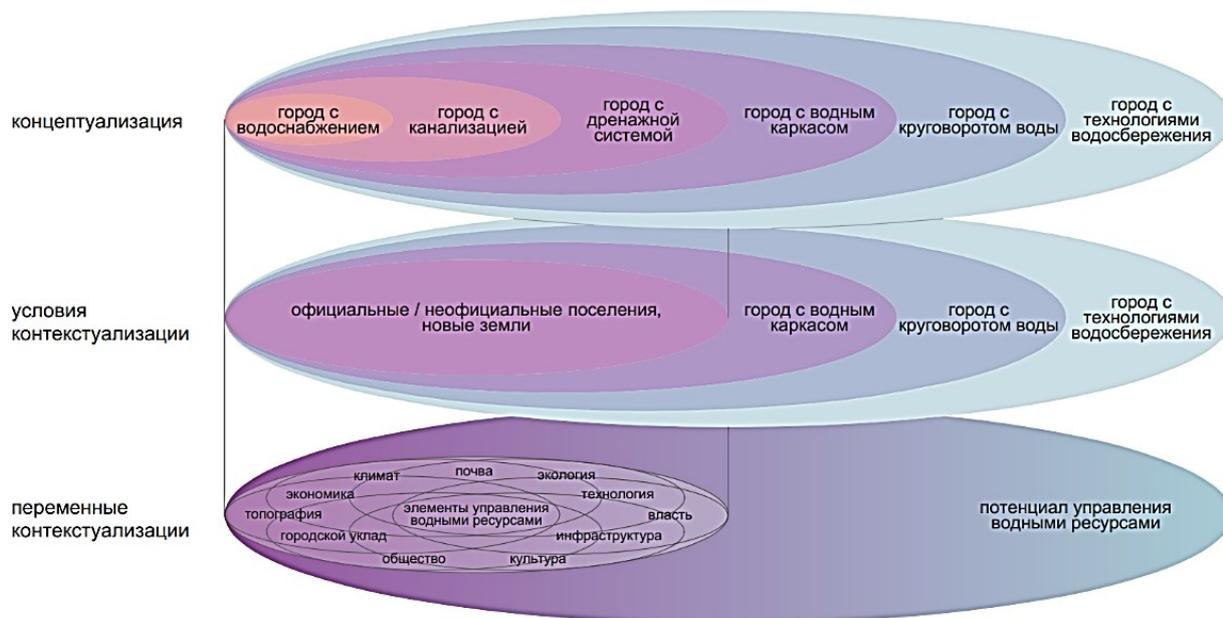


Рис. 1. Теоретическая основа концепции перехода к модели города с развитыми технологиями водосбережения

Предшествующее процессу городского проектирования, формирующее городскую среду, предварительное и непрерывное осмысление городского пространства, а также лежащего в его основе контекста и является по сути актом проектирования. Чтение, отображение и понимание контекста помогают архитекторам и градостроителям выявлять возможности среди многих сложностей и противоречий в городской среде, а также актуализировать и раскрывать этот потенциал. В этом свете управление водными ресурсами в равной степени относится к вдумчивости чтения, составлению планов и пониманию контекста и его динамики. Ожидается, что в будущем это оживит и продвинет важнейшее предварительное включение водных ресурсов в программы местного городского планирования и тем самым облегчит выход за пределы гипотетических уровней и абстрактности концепции, демонстрируя, что означает использование технологий водосберегающего проектирования в конкретном месте, и раскрывая определяющие переменные, характерные для конкретного участка, а также динамику прогнозирования изменений в области управления водными ресурсами.

Городской дизайн включает в себя абстрактные, сложные и открытые процессы проектирования, которые по определению зависят от конкретного объекта. Тем не менее, в его различных проявлениях можно выделить несколько общих элементов. С прагматической точки зрения городской дизайн можно рассматривать как исследовательский процесс проектирования изменений, учитывающий контекст, следующий руководящей концепции для достижения согласован-

ного результата проектирования и использующий свой собственный визуальный и вербальный язык. Эталонные проекты, имеющие определенный статус в свете конкретной задачи проектирования или проблемы, являются обычными инструментами проектирования и служат примерами того, как переменные объединяются для формирования методов проектирования в различных контекстах [20].

В качестве примера проекта, направленного на внедрение технологий водосберегающего проектирования в более широком диапазоне контекстов, можно рассмотреть комплексный региональный план управления водными ресурсами (IRWMP) в верховьях реки Санта-Клара, Калифорния. Штат Калифорния определил 24 различных стратегии управления водными ресурсами, которые могут быть использованы в качестве возможных путей решения будущих задач в области управления водными ресурсами. Для улучшения качества городской среды 24 стратегии разделены на пять категорий на основе целей, определенных заинтересованными сторонами (рис. 2):

- сокращение потребности в воде: внедрение технологических, законодательных и поведенческих изменений, которые снизят потребность пользователей в воде;
- повышение операционной эффективности: максимальная гибкость и эффективность работы системы водоснабжения, включая энергоэффективность;
- увеличение водоснабжения: понимание будущих региональных потребностей и получение необходимых источников водоснабжения;

- улучшение качества воды: обеспечение питьевой водой надлежащего качества, улучшение качества подземных вод, достижение стандартов качества воды;

- содействие рациональному использованию ресурсов: сохранение и улучшение здоровья экосистем, улучшение борьбы с наводнениями, сохранение и расширение рекреационных зон, использующих водные ресурсы.



Рис. 2. Пять категорий Калифорнийского плана водоснабжения

Калифорнийский план водоснабжения, который обновляется каждые пять лет в соответствии с требованиями Калифорнийского водного кодекса, является ресурсом для градостроителей, инженеров, менеджеров и политиков. Если говорить более кратко, то это стратегический план для всех регионов штата, который учитывает неопределенность будущих потребностей в воде, рекомендуя диверсифицированный подход, состоящий из множества стратегий и ряда краткосрочных и долгосрочных действий. Учитывая многочисленные водные проблемы, на которые штат должен активно реагировать, Калифорнийский план водоснабжения направлен на осуществление планирования в региональном масштабе и развитие управления водными ресурсами как междисциплинарного усилия по минимизации негативного гидрологического воздействия на окружающую среду. Все 24 стратегии были выбраны не случайно, а вследствие длительного анализа и изучения исходных данных территории и контекста для будущего внедрения концепции WSUD, что снова подчеркивает то, что технологии WSUD могут действовать с разной интенсивностью и эффективностью на разных участках с разными контекстуальными переменными.

В России в настоящее время так же происходят серьезные изменения в управлении поверхностными водами, и все большее предпочтение отдается водосберегающим технологиям [21]. В отечественной практике активно разрабатываются и внедряются градостроительные проекты, направленные на водосбережение. Далее мы рассмотрим некоторые из разрабатываемых программ и стратегий.

Проект «Эластичная лента», Казань. Ключевым замыслом данного проекта является формирование «сине-зелёного пояса» вдоль озёр Нижний, Средний и Верхний Кабан. Объединение природы и культуры легло в основу идеи о связи данных водных объектов в единую рекреационную систему (рис. 3). Авторы проекта разработали новую набережную, переосмыслив системы освещения и малые архитектурные формы, сделав акцент на ландшафтной инфраструктуре. На различных участках набережной высажено более тридцати видов новых трав и растений (камыш, аир, дербенник, рогоз, кувшинка и другие), кустарников и деревьев (ива, клен, ирга, черемуха, яблоня и другие). Недалеко от пешеходного перехода от улицы Айдинова в восточной части набережной расположился каскад водных растений, выполняющих функцию очистки воды.



Рис. 3. Проект «Эластичная лента», Казань

Стратегия развития рек Исети и Петрушки, Екатеринбург. Концепция набережной реки Исети, соединяющая различные районы города в единую структуру, была утверждена в марте 2022 года. Так как вдоль реки практически не было обустроенных территорий, благоустройство набережной было разделено на части. По замыслу авторов проекта набережная разделена на множество тематических участков, такие как Каучуковый остров, Урбан джангл, Набережная у ЖК, Штаб реки и другие. Общая концепция была утверждена с учетом мнения и потребностей жителей города. Участок, расположенный в непосредственной близости от центра города, может стать оазисом биоразнообразия, перформативным парком по смягчению влияния на реку и «зеленой» инфраструктурой, сохраняющей природу для активных екатеринбуржцев.

Проект ревитализации озера Цыганское (Тихое), Тюмень. Главными задачами, которые решает проект, являются очистка заболоченных берегов Цыганского озера и осуществление естественной фильтрации с помощью высаженных на берегах растений и каменных габионов, которые вместе образуют систему подпорных стенок. Благоустройство территории отражает идею слияния искусственного и естественного: приподнятые над берегами деревянные тропинки и отсутствие «светового шума» благодаря грамотно

спланированному освещению, которое не будет мешать птицам и животным. Акцентным элементом проекта выступает деревянная тропинка, которая выстилается над поверхностью воды по хорде и превращает его в амфитеатр. Данный проект разработан архитектурным бюро совместно с администрацией города Тюмени.

Квартал «Октябрьский», Тюмень. В данном проекте главным элементом концепции стали вадии, работающие по принципу «дождевого сада». Вадии представляют собой каналы, которые заполняются водой в период таяния снега, паводков и сильных дождей (рис. 4). Цель проекта – эффективное использование дождевой воды и сохранение экосистемы квартала. На территории были высажены новые виды трав, деревьев и кустарников, устойчивых к наводнениям. Растения выступают бионасосом – поглощают и испаряют воду, что снижает нагрузку на ливневую канализацию. Также функциями вадии является естественная фильтрация штормового потока вредных примесей и тяжелых металлов, поддержание биоразнообразия и создание благоприятных условий для жизни околосредовой фауны. Кроме того, вадии несут эстетическую функцию и станут гармоничным дополнением к ландшафту территории квартала.

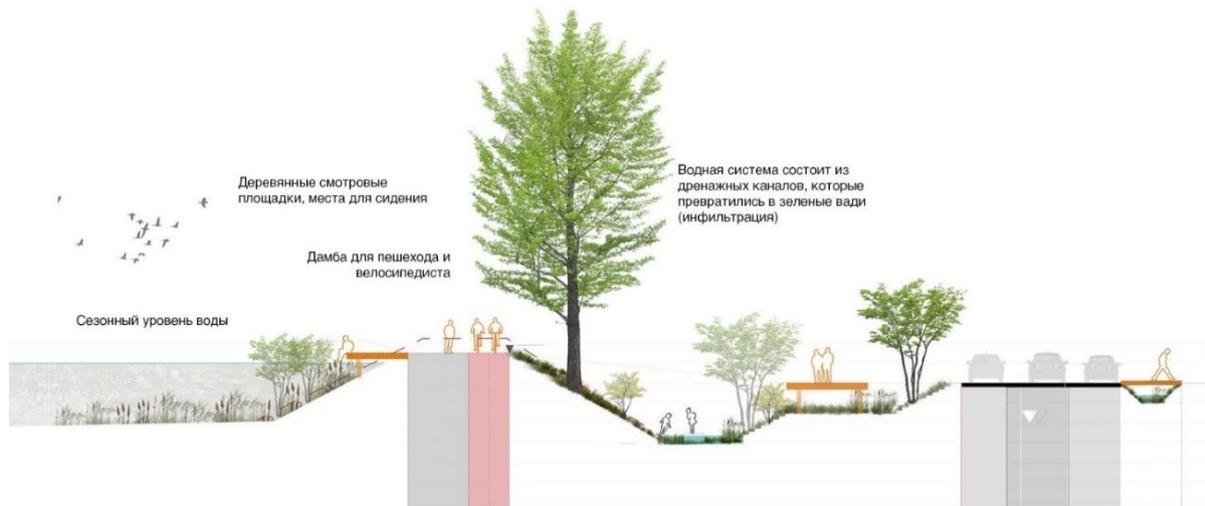


Рис. 4. Вадии в квартале «Октябрьский», Тюмень

Данные проекты не только показывают тенденции в работе с ландшафтной инфраструктурой с учетом сохранения водных ресурсов, но и показывают нам, как технологии водосбережения работают в различных контекстах: на участках различных габаритов от «сине-зеленых поясов» городов до дворовых территорий кварталов, вовлечением различного спектра заинтересованных сторон и с ожиданием различных результатов. И хотя мы видим положительную динамику развития водосбережения на территории России, внедрение технологий водосберегающего проектирования на широкий диапазон контекстов пока находится на начальном этапе развития и нуждается в масштабировании.

Выводы. Данное исследование позволило выявить градостроительные противоречия в направлении использования водосберегающих технологий в крупных городах, а также возможности, которые открывает градостроителям учёт контекста при внедрении новых концепций управления водными ресурсами. В ходе работы над исследованием были получены следующие результаты, которые могут нести теоретическую и практическую значимость:

1. Определена роль управления водными ресурсами в городском планировании. Видение процесса водосбережения в роли контекстуальной переменной позволит внедрить водосберегающие технологии в практику городского проектирования как инструмент, соответствующий местным средствам и физическому, культурному и социально-экономическому контексту. Это будет способствовать продвижению водосберегающего проектирования в программах городского планирования по всей стране.

2. Выявлены фундаментальные характеристики концепции водосбережения в крупном городе: управление водными ресурсами, городской дизайн и контекст. Концепция водосбережения переплетается с другими контекстными переменными, такие как климатические, топографические, экологические, почвенные и инфраструктурные условия, и вместе они определяют потенциал и пригодность мероприятий водосберегающего проектирования.

3. Проанализирован мировой и отечественный опыт использования технологий водосбережения в различных контекстах. Рассмотрены примеры проектов и программ различного масштаба (от «сине-зеленых поясов» городов до дворовых территорий кварталов), спектра вовлеченных сторон (от государственных органов до архитектурных бюро) и набора применяемых инструментов и методов водосберегающего проектирования.

Развитие концепций водосберегающего проектирования должно входить в список приоритетных направлений развития крупных городов, а учет контекста при внедрении данных концепций поможет усилить их эффективность, окажет благоприятное воздействие на качество жизни жителей и поспособствует устойчивому развитию городов и регионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. UN DESA (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York. 2018.
2. Roberts B.H. Managing Systems of Secondary Cities: Policy Responses in International Development. Brussels: Cities Alliance. 2014.
3. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. NY, USA. 2022. Pp. 3–33.
4. Veerbeek W., Deneke H.B., Pathirana A., Brdjanovic D., Zevenbergen C., Bacchin T.K. “Urban Growth Modeling to Predict the Changes in the Urban Microclimate and Urban Water Cycle.” Paper presented at 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre. 2011.
5. Wong T., Brown R. The water sensitive city: Principles for practice // Water Science and Technology. 2009. Vol. 2. No. 60. Pp. 673–682.
6. Abbott J., Davies P., Simkins P., Morgan C., Levin D., Robinson P. Creating Water Sensitive Places. London: CIRIA. 2013. Pp. 43–47.
7. Rijke J., Ashley R.M., Gersonius B., Sakic R. Adaptation mainstreaming for achieving flood resilience in cities. Clayton: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, Monash University. 2016.
8. Koop S.H., van Leeuwen C.J. The challenges of water, waste and climate change in cities. Environment // Development and Sustainability. 2017. Vol. 2. No 19. Pp. 385–418.
9. Cook S., van Roon M., Ehrenfried L., LaGro J., Yu Q. Case studies from Australia, New Zealand, United States, Europe, and Asia. Approaches to water sensitive urban design: Potential, design, ecological health, urban greening // Economics, Policies, and Community Perceptions. 2019. Pp. 561–585.
10. Крашенинников А.В. Мезо-пространства городской среды [Электронный ресурс] // АМИТ. 2015. № 4. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/4kvart15/krash/krash.pdf>

11. Глазычев В.Л. Социально-экологическая интерпретация городской среды. М.: Наука, 1984. 180 с.

12. Нефедов В.А. Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды: автореф. дис. ... докт. Арх.: 18.00.04. СПб., 2005. 44 с.

13. Нефёдов В.А. Ландшафтный дизайн и устойчивость среды. СПб., 2002. 295 с.

14. Вергунов А.П. Архитектурно-ландшафтная организация крупного города. Л.: Стройиздат, 1982. 134 с.

15. Вергунов А.П., Горохов В.А. Вертоград: Садово-парковое искусство России (от истоков до начала XX века). М.: Культура, 1996. 431 с.

16. Большаков А.Г. Восстановление нарушенных и деградированных территорий. История авторского метода геопластики // АМІТ. 2015. № 2. С. 1–17.

17. Большаков А.Г. Градостроительная организация ландшафта как фактор устойчивого

развития территории: дис. ... канд. арх.: 18.00.01. Иркутск, 2003. 424 с.

18. Садковская О.Е. Планировка и водный баланс территорий традиционных поселений Нижнего Дона // Architecture and Modern Information Technologies. 2018. № 2. С. 312–331.

19. Kuller M., Bach P.M., Ramirez-Lovering D., Deletic A. Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice // Environmental Modelling and Software 96. 2017. Pp. 265–282.

20. Van Dorst M.J. Een duurzaam leefbare woonomgeving [A sustainable livable living environment]. Delft: Eburon. 2005.

21. Дубино А.М., Перькова М.В. Использование технологий водосберегающего проектирования при проектировании малоэтажной жилой застройки // Архитектура и строительство России. 2022. № 3 (243). С. 52–57.

Информация об авторах

Дубино Анастасия Михайловна, аспирант кафедры архитектуры и градостроительства. E-mail: anastuzi@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 22.12.2023 г.

© Дубино А.М., 2024

Dubino A.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

E-mail: anastuzi@gmail.com

THE INFLUENCE OF CONTEXT SPECIFICS ON WATER RESOURCES MANAGEMENT IN LARGE CITIES

Abstract. Urban areas around the world are also facing a climate crisis – longer, irregular and unpredictable periods of extreme precipitation or heat. In urban areas, the consequences of these changes have the greatest impact on people's lives, and in large cities, these changes occur quickly. Water-based Urban Planning (WSUD) offers an approach to an alternative spatial organization of cities and infrastructures that meets urban and climate problems. However, instead of considering the use of water-saving design technologies as a fundamental concept of the final state of the urban environment, this study examines the theory that water conservation is a variable that depends on the context and other variables in the study area. Thus, water conservation acts as a link between the context and the concept, where the context forms the concept, and the concept provides a focus on how to take into account the context. Therefore, understanding the context helps architects and urban planners to identify opportunities among the many complexities and contradictions in the urban environment, which in the future will positively affect the inclusion of water resources in local urban planning programs and thereby facilitate going beyond hypothetical levels and abstractness of the concept.

Keywords: water resources management, WSUD, urban context, large city, urban environment, climate change.

REFERENCES

1. UN DESA (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York. 2018.

2. Roberts B.H. Managing Systems of Secondary Cities: Policy Responses in International Development. Brussels: Cities Alliance. 2014.

3. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. NY, USA. 2022. Pp. 3–33.

4. Veerbeek W., Deneke H.B., Pathirana A., Brdjanovic D., Zevenbergen C., Bacchin T.K. "Urban Growth Modeling to Predict the Changes in the Urban Microclimate and Urban Water Cycle." Paper presented at 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre. 2011.
5. Wong T., Brown R. The water sensitive city: Principles for practice. *Water Science and Technology*. 2009. Vol. 2. No. 60. Pp. 673–682.
6. Abbott J., Davies P., Simkins P., Morgan C., Levin D., Robinson P. *Creating Water Sensitive Places*. London: CIRIA. 2013. Pp. 43–47.
7. Rijke J., Ashley R.M., Gersonius B., Sakic R. *Adaptation mainstreaming for achieving flood resilience in cities*. Clayton: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, Monash University. 2016.
8. Koop S.H., van Leeuwen C.J. The challenges of water, waste and climate change in cities. *Environment. Development and Sustainability*. 2017. Vol. 2. No. 19. Pp. 385–418.
9. Cook S., van Roon M., Ehrenfried L., LaGro J., Yu Q. Case studies from Australia, New Zealand, United States, Europe, and Asia. *Approaches to water sensitive urban design: Potential, design, ecological health, urban greening. Economics, Policies, and Community Perceptions*. 2019. Pp. 561–585.
10. Krashennikov A.V. Meso-spaces of the urban environment [Mezo-prostranstva gorodskoj sredy]. AMIT. 2015. No. 4. URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/4kvart15/krash/krash.pdf> (rus)
11. Glazychev V.L. Socio-ecological interpretation of the urban environment [Social'no-ekologicheskaya interpretaciya gorodskoj sredy]. M.: Nauka, 1984. 180 p. (rus)
12. Nefyodov V.A. Architectural and landscape reconstruction as a means of optimizing the urban environment: abstract... Doct. Arch.: 18.00.04. [Arhitekturno-landshaftnaya rekonstrukciya kak sredstvo optimizacii gorodskoj sredy: avtoref. dis. ... dokt. Arh.]. St. Petersburg, 2005. 44 p. (rus)
13. Nefyodov V.A. Landscape design and environmental sustainability [Landshaftnyj dizajn i ustojchivost' sredy]. St. Petersburg, 2002. 295 p. (rus)
14. Vergunov A.P. Architectural and landscape organization of a large city [Arhitekturno-landshaftnaya organizaciya krupnogo goroda]. L.: Stroyizdat, 1982. 134 p. (rus)
15. Vergunov A.P., Gorohov V.A. *Vertograd: Landscape art of Russia (from the origins to the beginning of the XX century)* [Vertograd: Sadovo-parkovoe iskusstvo Rossii (ot istokov do nachala XX veka)]. M.: Kultura, 1996. 431 p. (rus)
16. Bol'shakov A.G. Restoration of disturbed and degraded territories. The history of the author's method of geoplasty [Vosstanovlenie narushennyh i degradirovannyh territorij. Istoriya avtorskogo metoda geoplastiki]. AMIT. 2015. No. 2. Pp. 1–17. (rus)
17. Bol'shakov A.G. Urban planning organization of the landscape as a factor of sustainable development of the territory: dis. ... candidate of Architecture: 18.00.01. [Gradostroitel'naya organizaciya landshafta kak faktor ustojchivogo razvitiya territorii: dis. ... kand. arh.]. Irkutsk, 2003. 424 p. (rus)
18. Sadkovskaya O.E. Planning and water balance of territories of traditional settlements of the Lower Don [Planirovka i vodnyj balans territorij tradicionnyh poselenij Nizhnego Dona]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. No. 2. Pp. 312–331. (rus)
19. Kuller M., Bach P.M., Ramirez-Lovering D., Deletic A. Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling and Software* 96. 2017. Pp. 265–282.
20. Van Dorst M.J. *Een duurzaam leefbare woonomgeving [A sustainable livable living environment]*. Delft: Eburon. 2005.
21. Dubino A.M., Perkova M.V. The use of water-saving design technologies in the design of low-rise residential buildings [Ispol'zovanie tekhnologij vodosberegayushchego proektirovaniya pri proektirovanii maloetazhnoj zhiloy zastrojki]. *Architecture and Construction of Russia*. 2022. No. 3 (243). Pp. 52–57. (rus)

Information about the authors

Dubino, Anastasia M. Postgraduate student. E-mail: anastuzi@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 22.12.2023

Для цитирования:

Дубино А.М. Влияние специфики контекста на управление водными ресурсами в крупных городах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 47–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-47-55

For citation:

Dubino A.M. The influence of context specifics on water resources management in large cities. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 3. Pp. 47–55. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-47-55

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-56-65

Го Цзэюй

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: mc172839456@gmail.com

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КИТАЕ

Аннотация. В настоящее время в большинстве стран происходит изменение национальной политики по утилизации отходов: от захоронения на полигонах (свалках) к переработке и вторичному использованию. В Китае при выборе способа утилизации в первую очередь рассматривались мусоросжигательные электростанции, поскольку они занимают небольшую площадь, быстро перерабатывают отходы, сокращают их количество, не загрязняют окружающую среду и имеют высокую степень извлечения энергии. Тем не менее, существующие объекты, в большинстве своем, монофункциональны, а территории их размещения носят депрессивный характер. Это приводит к социальному неприятию населением и отказу от строительства мусоросжигательных электростанций в необходимом количестве. Целью данной статьи является определение принципов функционально-планировочной организации мусоросжигательных электростанций в Китае. Изучен существующий опыт реализации и проектирования многофункциональных мусоросжигательных электростанций в Китае, выполнен графический анализ градостроительного размещения и организации участков, определены основные блоки, входящие в состав объектов, установлены функционально-планировочные взаимосвязи между ними. Изучены варианты формообразования и архитектурного воплощения объектов мусоропереработки. Результатом исследования является формулировка принципов функционально-планировочной организации многофункциональных мусоросжигательных электростанций в Китае.

Ключевые слова: архитектура, функционально-планировочные решения, мусоросжигательная электростанция, отходы, Китай.

Введение. Проблема безопасной утилизации отходов и изменения принципов обращения с ними актуальны для всего мира. Китай не является исключением [1]. С 2017 года в стране изменилась государственная политика по обработке отходов: от захоронения на полигонах (свалках) к переработке и вторичному использованию [2].

В связи с активным развитием экономики Китая потребность в ресурсах резко возросла. Поэтому сжигание и последующее производство электроэнергии стало одним из альтернативных путей, как оптимизации переработки отходов, так и решения нехватки естественных энергоресурсов. Поэтому здания мусоросжигательных электростанций интенсивно интегрируются в энергетическую систему Китая [3].

Китай строит мусоросжигательные электростанции с 1989 года, и количество мусоросжигательных электростанций по всей стране увеличилось со 138 в 2012 году до 463 к концу 2020 года, с мощностью утилизации 567 800 тонн в день [4]. Однако большинство объектов моно функциональны, не имеют эстетического решения образа, их архитектура утилитарна, что ведет к социальному неприятию населением. Более того, в некоторых регионах существующих мусоросжигательных станций не достаточно, поэтому требуется интеграция новых объектов. Однако их социальное восприятие населением остается отрицательным [5]. Поэтому необходим поиск гуманизации архи-

тектуры мусоросжигательных электростанций, который может быть достигнут благодаря функционально-планировочным и образным решениям объектов [6].

Целью публикации данной статьи является определение принципов функционально-планировочной организации мусоросжигательных электростанций в Китае.

Поставлены **следующие задачи:** изучить существующий опыт реализации и проектирования многофункциональных мусоросжигательных электростанций в Китае; выявить основные функциональные блоки, входящие в состав объектов; установить функционально-планировочные взаимосвязи выявленных блоков; предложить принципы функционально-планировочной организации мусоросжигательных электростанций в Китае.

Объект исследования – архитектура мусоросжигательных электростанций.

Степень изученности проблемы. Согласно обзору зарубежных источников по теме развития промышленной архитектуры, в частности архитектуры объектов мусоропереработки, отмечены такие тенденции как гуманизация образа зданий, их интеграция в городскую среду, а также применение принципов устойчивой архитектуры, как на объемно-планировочном, так и на градостроительном уровне. Это отражено в работах российских авторов Шамаевой Т.В., Супранович В.М.

Однако в Китае иные тенденции развития и реализации промышленных объектов. Представленные в работах Ван Сяочунь, Бао Ясянь, Тон Сюэинь сведения и требования подтверждают, в большинстве своем, утилитарный подход к проектированию объектов мусоропереработки.

В статье Мэн Сонгцин и Ляо Ибинь отмечают, что в дополнение к своему основному назначению электростанции по сжиганию отходов постепенно осваивают и другие функции, такие как строительство озелененных и экологически чистых зданий, интеграция с городской средой, объекты, приносящие пользу району, интеграция с городской функцией, выставочные и научно-практические функции. Использование приемов архитектурного дизайна делает промышленные здания экологически чистыми и служит проводником корпоративной и городской инфраструктуры.

Методы исследования. Для определения функционально-планировочных принципов существующих китайских мусоросжигательных электростанций в качестве основного метода исследования применен комплексный анализ. Изучены существующие примеры полифункциональных объектов мусоросжигания в Китае. Определены характерные особенности градостроительного размещения объектов, их функционально-планировочная структура, в том числе технические требования к производственным помещениям. Выявлена связь между нормативными параметрами объекта и его формообразованием, влиянием технологических процессов на архитектуру зданий.

Основная часть. В качестве примеров полифункциональных объектов мусоросжигательных электростанций выбраны следующие объекты:

- электростанция по сжиганию бытовых отходов в Нинбо Иньчжоу (рис. 1);
- Ханчжоу linjiang environmental energy project (рис. 1);
- проект центра конечной утилизации бытовых отходов в Шанхае фэнсянь (рис. 1);
- проект Шэньчжэньской восточной электростанции по охране окружающей среды (рис. 1);
- проект третьей электростанции по сжиганию отходов в Чунцине (рис. 1);
- проект экологический промышленный парк по переработке отходов города Шаосин (ФАЗА II) проект мусоросжигательная электростанция (рис. 1).

На рисунке 1 представлен графический анализ объектов мусоросжигания в Китае, позволяющий комплексно оценить такие параметры зданий

как градостроительное размещение, планировочное зонирование, формообразование, а также образное решение фасадов [7].

Согласно комплексному анализу данных выявлены следующие особенности градостроительного размещения мусоросжигательных электростанций в Китае:

- размещение участка внешне городских границ;
- интеграция объекта в существующую среду;
- диапазон площадей участка 50–230 тыс. кв. м. Большая часть из них сосредоточена на площади 220 тыс. кв. м, а общая площадь зданий составляет 55–66 % от площади участка, причем на производственный блок приходится около 65 % площади зданий, на дополнительный блок – 15 %, на административный блок – 20 %;
- транспортная доступность объекта – расстояние от объекта до магистральной дороги или шоссе в основном составляет от 1 до 2 км;
- применение вертикальной планировки для экономии строительных работ: относится к естественному рельефу участка, преобразуемому для адаптации его к строительным и производственным требованиям проекта [8]. Такое расположение не ограничено расстоянием между колоннами, и оно является гибким [9];
- учет преобладающих ветровых направлений;
- композиционное размещение блоков и зонирование на участке – административная зона обычно располагается рядом с входом на территорию завода [10]. Производственный блок является ядром электростанции по сжиганию бытовых отходов и обычно располагается в центральной части завода, включая главную установку, дымовую трубу и погрузочную рампу. Зона водоподготовки создает шум и белый водяной туман, поэтому ее обычно располагают в зоне, удаленной от потока посетителей [11]. Здания и сооружения вспомогательной производственной зоны разбросаны и относительно самостоятельны, некоторые из них удалены от производственного цеха в связи с требованиями противопожарной и взрывобезопасности и расположены на периферии производственного блока в целях безопасности [12];
- наличие дополнительных элементов участка мусоросжигательных электростанций: ландшафтный бассейн, градирня, встроенный водяной насос, очиститель воды, участок аммиака, маслонасосная, бассейн для сбора промышленных сточных вод, станция очистки фильтрата, ясеневая комната.

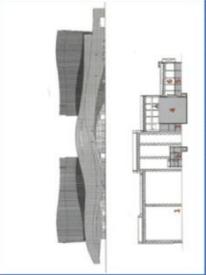
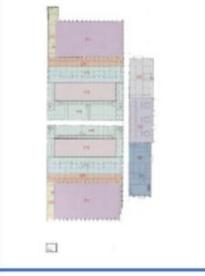
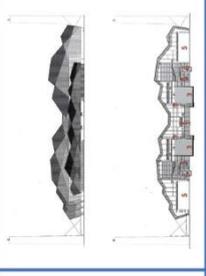
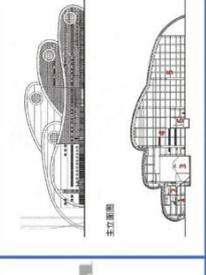
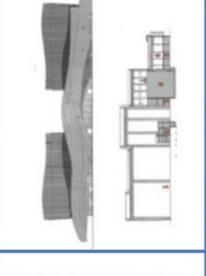
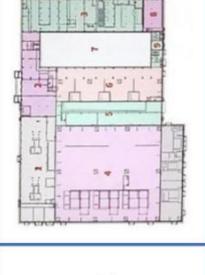
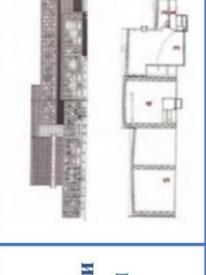
<p>ПРОЕКТ "ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПАРК ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ГОРОДА ШАОСИН (ФАЗА II) ПРОЕКТ "МУСОРОСЖИГАТЕЛЬ НАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ / КИТАЙСКАЯ ОБЪЕДИНЕННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ КОМПАНИЯ</p>				
<p>ПРОЕКТ ТРЕТЬЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПО СЖИГАНИЮ ОТХОДОВ В ЧУНЦИНЕ / ШЭНЬЧЖЭНЬ ТАН ХУА АРХИТЕКТУРНО-ДИЗАЙ НЕРСКОЕ БЮРО ЛТД.</p>				
<p>ПРОЕКТ ШЭНЬЧЖЭНЬСКОЙ ВОСТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ / ВОСТОЧНО-КИТАЙСКИЙ ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СО.</p>				
<p>ПРОЕКТ ЦЕНТРА КОНЕЧНОЙ УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ШАНХАЕ ФЭНСЯНЬ / ЧЖАН ИНМЭИ</p>				
<p>ХАНЧЖОУ LINJIANG ENVIRONMENTAL ENERGY PROJECT / ФЭН ЧЖИСЯН</p>				
<p>ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ПО СЖИГАНИЮ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В НИНБО ИНЬЧЖОУ/AIA Architectes</p>				
<p>Название объекта</p>	<p>Генеральн ы планы</p>	<p>Планы</p>	<p>Фасады и разрезы</p>	<p>Перспект ива</p>

Рис. 1. Графический анализ полифункциональных мусоросжигательных электростанций в Китае

Функционально-планировочная схема включает следующие блоки [13]:

- Административный блок;
- Производственный блок;
- Дополнительный блок.

Выявленные блоки включают:

– Административный блок – как правило, включает отдельные объекты/элементы, для проживания сотрудников (корпус общежития). Зону офисов (кабинеты сотрудников, переговорные, помещения технического обеспечения, зоны отдыха, приема пищи, санитарные комнаты) и учебный центр (помещения для обучения, лекционные помещения, рекреации, помещения технического обеспечения, зоны отдыха, приема пищи, санитарные комнаты) [14];

– Производственный блок – производственные цеха по сжиганию отходов и получению энергии (машинный зал, центральная диспетчерская, комната химической воды и вспомогательный цех, помещение для очистки дымовых газов, помещение для удаления шлака, помещение для сжигания, платформа для сброса мусора; мусорный бассейн, воздушная компрессорная станция, подсобное помещение, комната обработки летучей золы);

– Дополнительный блок включает помещения для занятий спортом, выставочные пассажи, музеи мусора и т. д.

– К помещениям в блоках предъявляют следующие технические требования:

– главный цех должен быть разделен на зоны управления производством, эксплуатации и технического обслуживания;

– обязательна организация залов для разгрузки мусора, ямы для хранения мусора, помещения для очистки воды, воздушные компрессорные станции, инструментальные помещения, ремонтные мастерские, котельные, централизованное управление паротурбинными и газоотводными станциями, газоподготовка, дымоход, наливная рампа [15];

– яма для хранения мусора - закрытый зал для разгрузки мусора, а платформа для разгрузки мусора – монолитная железобетонная конструкция, геометрические параметры по длине и ширине должны соответствовать требованиям разгрузки мусоровоза;

– под мусороразгрузочной площадкой, располагают вспомогательные цеха: воздушные компрессорные станции, водоочистные и ремонтные мастерские;

– котельная, помещение для отвода шлака и помещение для очистки дымовых газов располагаются последовательно с одной стороны мусорной ямы, а в цехе размещено основное оборудование всего завода – мусоросжигательная печь, котел-утилизатор и устройство для очистки дымовых газов [16]. Высота цеха — самая высокая точка основного цеха, превышает 40 метров;

– комната паровой турбины располагается сбоку от котельной, высота – четыре/пять этажей;

– сторона машинного зала включает распределительную комнату высокого и низкого напряжения, центральную диспетчерскую, кабельную и производственный офис;

– пост управления мусороуборочным краном располагается на одном уровне с площадкой для подачи мусора, обычно в конце мусорной ямы или на противоположной стороне загрузочного бункера;

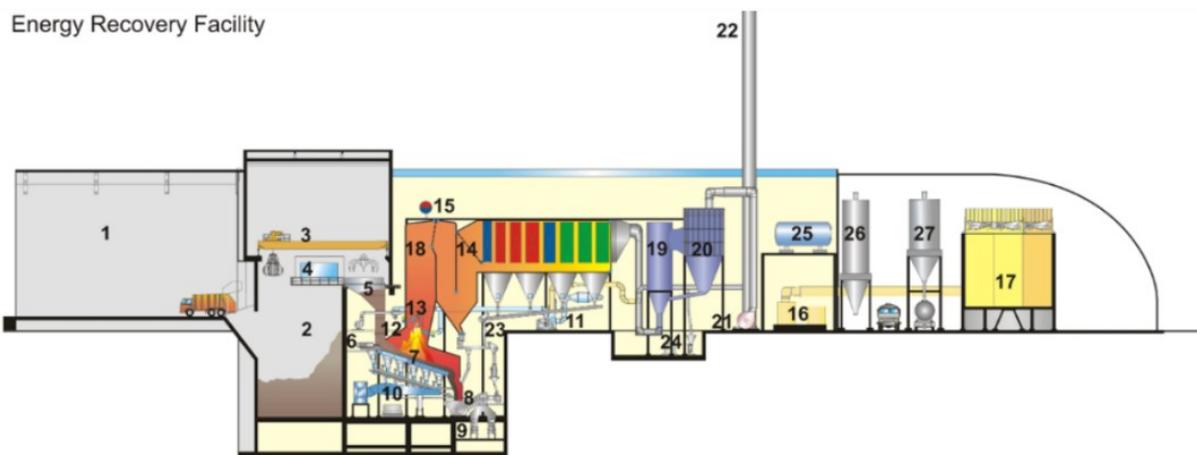
– вспомогательные помещения, такие как вестибюль, помещения для персонала и т. д., должны иметь непосредственную связь с производством и отвечать технологическим требованиям доступа к нему [17]. Когда общая площадь производственной зоны относительно мала, административные офисы также могут быть расположены в главном здании фабрики [18]. Такая конструкция не только экономит место, но и повышает эффективность коммуникации между управленческим персоналом и производственным персоналом;

– ко всем помещениям и цехам предъявляются такие требования как оптимальная форма плана (то есть соответствующая производственному процессу) и компактные площади;

– смежная организация технического блока – линейная композиция объемов, выстроенных друг за другом, в соответствии с технологическими процессами производства [19];

– конструктивные решения должны учитывать требования к транспортировке и хранению мусора в сочетании с требованиями хода строительства проекта [20]. Поэтому главный корпус здания мусоросжигательной электростанции имеет железобетонный или гнутый каркас, дополненный решетчатой структурой [21].

Таким образом, смежная организация технического блока представляет собой линейную композицию объемов, выстроенных друг за другом, в соответствии с технологическими процессами производства (рис. 2) [22].



Прием и хранение отходов

- 1 Разгрузочный зал
- 2 Яма для мусора
- 3 Кран для отходов
- 4 Диспетчерская

Сгорание, котел и выработка энергии

- 5 Загрузочный бункер
- 6 Дозатор-питатель
- 7 Поворотная решетка для сжигания отходов
- 8 Золоуловитель
- 9 Конвейер шлака
- 10 Первичная подача воздуха
- 11 Вентилятор рециркуляции вторичного воздуха/дымовых газов

- 12 Впрыск вторичного воздуха/рециркуляции дымовых газов
- 13 Вспомогательный бумер
- 14 Четырехходовой котел
- 15 Барабан котла
- 16 Турбогенераторная установка
- 17 Воздушный конденсатор

Очистка дымовых газов

- 18 уровней впрыска SNCR DeNOx
- 19 Полусухой реактор
- 20 Полусухой рукавный фильтр
- 21 Вентилятор с принудительной тягой
- 22 Дымоход

Расходные материалы и остатки

- 23 Система транспортировки золы котла
- 24 Система транспортировки остатков
- 25 Резервуар питательной воды
- 26 Силос для гашеной извести
- 27 Бункер для остатков

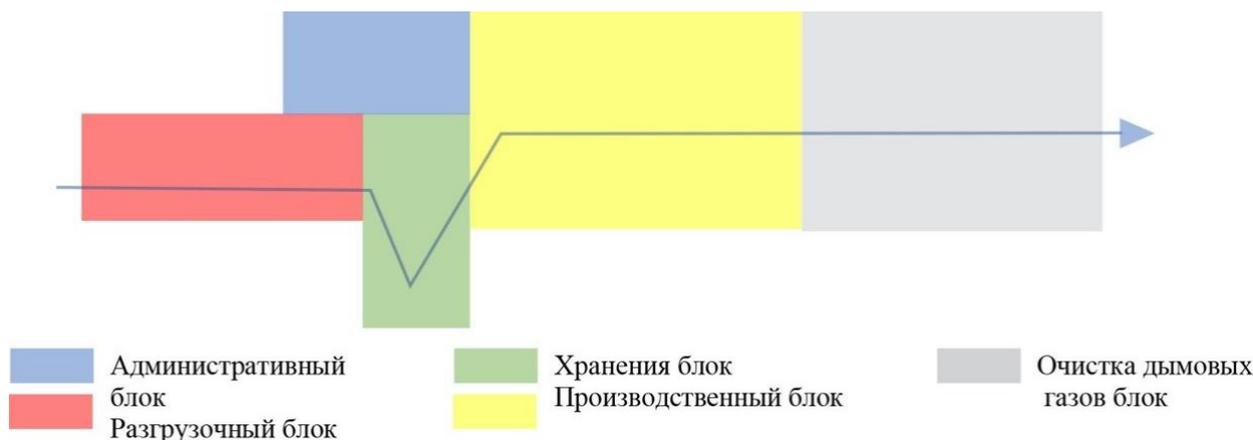


Рис. 2. Технологический процесс производства и зонирование мусоросжигательной электростанции

Выводы. Установлена связь между нормативными параметрами объекта и его формообразованием. Для каждого примера выявлена функционально-планировочная схема организации объекта (рис. 3).

Из шести представленных примеров, пять имеют прямоугольные очертания плана для общего объема здания, и лишь один – круг. Но во всех шести объектах сохранена «линейность» производства. Зона производственного блока в функционально-планировочной организации здания имеет главную роль. Относительно данной зоны размещаются другие блоки, и решается формообразование объекта: несколько композиционных элементов, имеющих различные геометрические очертания. Масштаб – укрупненный. Наблюдается тенденция к использованию большого процента

«глухих» фасадных поверхностей, при ярко выраженной симметричной форме объемов.

Административный блок размещается как вне объекта отдельным модулем, так и включается в объем здания мусоросжигательной электростанции.

У всех вышеперечисленных предметов есть дополнительные блоки для выставок, образования и многого другого, что подтверждает возможность реализации полифункциональных объектов мусоропереработки с учетом технологических требованиями процесса утилизации.

Полученные данные позволяют выявить следующие принципы функционально-планировочной организации полифункциональных мусоросжигательных электростанций в Китае:

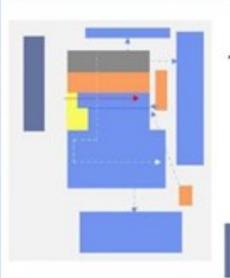
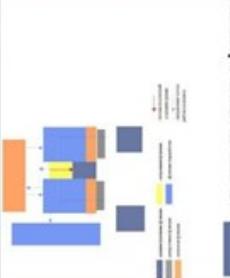
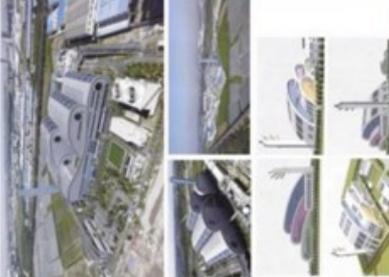
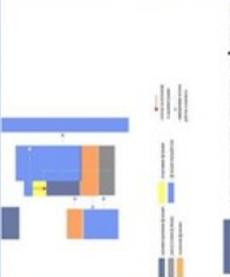
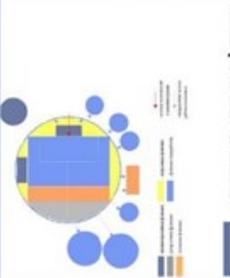
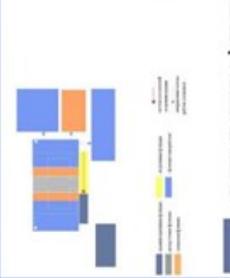
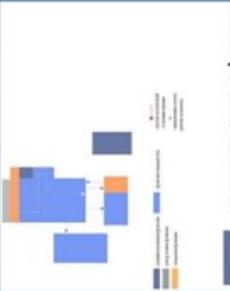
<p>Назва и название объекта</p>	<p>Изображение с объекта (карта, информация внешнего вида)</p>	<p>функционально-планировочная схема объекта</p>
<p>ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ПО СЖИГАНИЮ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В НИНБО ИНЬЧЖОУ/ALA Architects</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - встроена функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса
<p>ХАНЧЖОУ LINLANG ENVIRONMENTAL ENERGY PROJECT / ФЭН ЧЖИНСЯН</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - встроена функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса
<p>ПРОЕКТ ЦЕНТРА УТИЛИЗАЦИИ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ШАНХАЕ ФЭНСЯНЬ / ЧЖАН ИМЭН</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - встроена функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса
<p>ПРОЕКТ ШЭНЬЧЖЭНЬСКОЙ ВОСТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПО ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ / ВОСТОЧНО-КИТАЙСКИ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ СО.</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - встроена функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса
<p>ПРОЕКТ ТРЕТЬЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПО СЖИГАНИЮ ОТХОДОВ В ЧУНЦИ / ШЭНЬЧЖЭНЬ ТАНХУА АРХИТЕКТУРНО-ДИЗАЙН И ИНЖЕНЕРНАЯ КОМПАНИЯ</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - встроена функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса
<p>ПРОЕКТ "ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПАРК ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ ГОРОДА ШАОСИН (ФАЗА II) ПРОЕКТ "МУСОРОСЖИГАТЕЛЬН АЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ / КИТАЙСКАЯ ОБЪЕДИНЕННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ КОМПАНИЯ</p>		 <ul style="list-style-type: none"> - административная функция - разгрузочная функция - функция переработки - складская функция - потоки посетителей - и администрации - направление потока работы комплекса

Рис. 3. Функционально-планировочные схемы организации объектов и их формообразование

– **принцип «интеграции»** – здание мусоросжигательной электростанции интегрируется в окружающий контекст, с учетом существующего ландшафта, среды, застройки, как на градостроительном, так и на архитектурно-художественном уровне. Другими словами, мусоросжигательная электростанция постепенно превращается из монофункционального объекта в более сложный комплекс со знаковыми архитектурными формами, символизирующими технологии возобновляемой энергии, охраны окружающей среды и научного подхода;

– **принципы «оптимизации внутренних процессов»** – внутреннее пространство организуется в соответствии с процессом обработки мусора для обеспечения эффективной работы и энергетического восстановления за счет разделения на зоны: приема мусора, сжигания, зоны с оборудованием для генерации электроэнергии и зоны для обработки выбросов и отходов. Организация данных зоны позволяет обеспечивать плавный и эффективный процесс обработки мусора. Внутреннее пространство должно учитывать размещение оборудования, и рабочие зоны, с учетом удобства движения и транспортировки персонала;

– **принцип «безопасности»** – мусоросжигательные электростанции являются опасными производственными объектами, поэтому организация внутреннего пространства должна учитывать аспекты как пожарной, так и экологической безопасности. Это включает в себя рассмотрение движения персонала, опасности возгорания и выбросов вредных газов, а также принятие соответствующих мер безопасности, таких как установка аварийных выходов, огнестойких стен и автоматических систем пожаротушения. Защита окружающей среды достигается минимизацией негативного воздействия на окружающую среду. Поэтому в организации внутреннего пространства следует учитывать размещение систем очистки выбросов и сточных вод, чтобы эффективно очищать и обрабатывать выбросы и сточные воды, снижая загрязнение атмосферы и водных ресурсов;

– **принцип «баланса»** – форма и композиция мусоросжигательной электростанции сочетает технические и эстетические требования к решению объекта. Материалы и текстуры могут варьироваться от современных и промышленных, до естественных и экологически дружелюбных. Возможно использование стекла, металла, бетона, кирпича, дерева и других материалов, которые подчеркивают функциональность и эстетику здания;

– **принцип «света и тени»** – разработка нескольких «сценариев» освещения фасадов и использование цветовых акцентов, для создания эффектов восприятия фасадов и выявления архитектурных деталей в разное время суток/времени года.

Возможно использование искусственных элементов, таких как муралы, скульптуры или инсталляции, чтобы придать зданию уникальность и художественный характер. Эти элементы могут быть связаны с темой утилизации отходов или с символикой экологической устойчивости.

Приведенные функционально-планировочные принципы позволяют применять инновационные подходы создания архитектуры мусоросжигательных электростанций в Китае, гуманизировать облик зданий, преодолеть такие социальные проблемы как неприятие населением мусоросжигательных объектов, сокращение «депрессивных» промышленных зон и обеспечить гармоничную интеграцию объектов в окружающий контекст.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ван Сяочунь. Проектирование и применение мусоросжигательной электростанции // Электроэнергетика Внутренней Монголии. 2014. №6(32). С. 212–214. DOI:10.3969/j.issn.1008-6218.2014.06.022
2. Министерство жилищного строительства и городского и сельского развития и др. Уведомление о комплексном проведении работ по классификации бытовых отходов в городах уровня префектуры и выше по всей стране – 2019 г. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201906/t20190606_240787.html (дата обращения: 09.04.2023).
3. Шао Шиксюэ. Состояние развития и перспективы городской мусоросжигательной энергетики [Дж] // Товар и качество. 2017. №48(13). С. 33–35. DOI:10.3969/j.issn.1006-656X.2017.48.011
4. Цао Айфан, Фань Ици. Объем вывоза мусора в центральном городе Нинбо превысил 5000 тонн [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.cn-hw.net/html/china/201507/50012.html> (дата обращения: 16.04.2023).
5. Бюллетень о состоянии экологической среды Автономного района Внутренняя Монголия на 2022 год – 2023 [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: <https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1067267> (дата обращения: 10.05.2023).
6. Го Цзэюй. Тенденции развития архитектуры мусороперерабатывающих объектов Китая // LXXVI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2023. №4. С.45–49.
7. Ду Сянфэй., Шу Пинцзэн. Краткая дискуссия о деиндустриализационной трансформации

зданий электростанций // Теоретические исследования городского строительства. 2018. №24. С. 60–61.

8. Ван Дапэн. «Деиндустриализация» промышленного архитектурного проекта на примере нескольких проектов электростанций, работающих на отходах // Книжный город. 2018. №06. С. 79–86.

9. Бао Ясянь. Обсуждение проекта электростанции по сжиганию бытовых отходов // Инженерия окружающей среды. 2012. №6. С. 118–121.

10. Анлэ, Ян Чжихуэй., Чжоу Яхуэй. Метод деиндустриализации архитектурного проектирования // Журнал Уханьского университета. 2017. №11(50). С. 78–82.

11. Тон Сюэинь. Анализ и исследование «деиндустриальных» методов проектирования промышленных зданий // Управление химической промышленностью. 2018. №2. С. 179–180. DOI:10.3969/j.issn.1008-4800.2018.05.145.

12. Ли Шипин. Краткая дискуссия об управлении охраной окружающей среды на мусоросжигательных электростанциях // Управление и технологии малых и средних предприятий (первый выпуск). 2018. №7. С. 12–13. DOI:10.3969/j.issn.1673-1069.2018.19.

13. Го Цзююй., Супранович В.М. Функционально-планировочная организация мусоросжигательных электростанций в Китае // Сборник научных трудов кафедры архитектурного проектирования за 2022-2023 гг. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. 2023. №5. С. 41–45. DOI:721.011.12/725.4.

14. Чжан Ли. Анализ источников загрязнения окружающей среды, а также меры по предотвращению и контролю на мусоросжигательных электростанциях // Гуанчжоуская химическая

промышленность. 2018. №46(09). С. 63–64. DOI:10.3969/j.issn.1001-9677.2018.09.03.

15. Ли Гэнтао. Дизайн фасадов промышленных зданий в новой среде // Строительные материалы и отделка. 2018. №8(85). С. 112–113. DOI:10.3969/j.issn.1673-0038.2018.35.067.

16. Мэн Сунцин. Дискуссия о проекте деиндустриализации внешнего фасада мусоросжигательной электростанции // Шаньдунские промышленные технологии. 2018. №10(32). С. 107–108. DOI:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.10.098.

17. Ляо Ибинь, Сунь Ху. Ван Е. О «деиндустриализации» архитектурного планирования и проектирования // Исследования теории городского строительства. 2019. №7. С. 90–91. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.201907079.

18. Ли Юнь. Анализ природоохранных мероприятий на городских мусоросжигательных электростанциях // Bohai Rim Economic Outlook. 2017. №7. С. 122–123.

19. Жэнь Цюнь. Исследование городской мусоросжигательной электростанции // Сианьский университет архитектуры и технологий. 2014. № 5. С. 65–66. DOI:10.7666/d.y616794

20. Юй Ин, Сюй Цзюньцзянь, Шэнь Чунянь. Проект и концепция деиндустриализации электростанции Хуанэн Чансин // Архитектура Чжэцзян. 2013. № 09. С. 10–11.

21. Чжу Хао. Оптимальная стратегия проектирования новых ресурсных теплоэлектростанций с точки зрения участия общественности (Д). // Гуанчжоу: Южно-Китайский технологический университет. 2020. №5. С. 66–68.

22. Шамаева Т.В. Устойчивое развитие архитектурного облика промышленных объектов на примере зарубежного опыта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. №12. С. 46–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61.

Информация об авторах

Го Цзююй, аспирант кафедры архитектурного проектирования. E-mail: mc172839456@gmail.com. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 19.11.2023 г.

© Го Цзююй, 2024

Guo Zeyu

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: mc172839456@gmail.com*

PRINCIPLES OF FUNCTIONAL-PLANNING ORGANIZATION OF INCINERATION POWER PLANTS IN CHINA

Abstract. At present, most countries are changing their national waste management policies from landfill disposal to recycling and reuse. In China, incineration power plants have been the first choice of disposal method because they occupy a small area, process waste quickly, reduce the amount of waste, do not pollute the environment, and have a high energy recovery rate. Nevertheless, the existing facilities are mostly mono-functional and the areas where they are located are depressive in nature. This leads to social rejection by the

population and refusal to build incinerator power plants in the necessary quantity. The purpose of this article is to determine the principles of functional-planning organization of incinerator power plants in China. The existing experience of realization and designing of multifunctional incinerating power plants in China is studied, the graphic analysis of town-planning location and organization of sites is executed, the basic technological blocks, which are included in objects, are defined, functional-planning interrelations between them are established. The variants of shaping and architectural embodiment of garbage processing facilities have been studied. The result of the research is the formulation of the principles of functional-planning organization of multifunctional incineration power plants in China.

Keywords: *architecture, functional-planning solutions, incineration power plant, waste, China.*

REFERENCES

1. Wang Xiaochun. Design and application of incinerator power plant [Proektirovanie i primeneniye musoroszhigatel'noj elektrostancii]. Inner Mongolia Electric Power Industry. 2014. No.6. Vol. 32. Pp. 212–214. DOI:10.3969/j.issn.1008-6218.2014.06.022.
2. Department of Housing and Urban and Rural Development et al. Notice on the comprehensive implementation of household waste classification work in cities of prefecture level and above nationwide - 2019. [Ministerstvo zhilishchnogo stroitelstva i gorodskogo i selskogo razvitiya i dr. Uvedomlenie o kompleksnom provedenii rabot po klassifikatsii bytovykh otkhodov v gorodakh urovnya prefektury i vyshe po vsej strane – 2019 g.]. AdobeAcrobatReader. URL: http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201906/t20190606_240787.html (date of treatment: 09.04.2023).
3. Shao Shixue. Development status and prospects of urban incineration energy [J] [Sostoyanie razvitiya i perspektivy gorodskoj musoroszhigatel'noj energetiki [Dzh]. Commodity and quality. 2017. No.48. Vol.13. Pp. 33–35. DOI:10.3969/j.issn.1006-656X.2017.48.011.
4. Cao Aifang., Fan Yiqi. The volume of garbage disposal in the central city of Ningbo has exceeded 5000 tons. [Obem vyvoza musora v tsentralnom gorode Ninbo prevysil 5000 tonn]. AdobeAcrobatReader. URL: <http://www.cn-hw.net/html/china/201507/50012.html> (date of treatment: 16.04.2023).
5. Bulletin on the state of ecological environment of the Autonomous Region of Inner Mongolia for 2022 - 2023. [Byulleten o sostoyanii ekologicheskoy sredy Avtonomnogo rayona Vnutrennyaya Mongoliya na 2022 god – 2023]. AdobeAcrobatReader. URL: <https://www.cenews.com.cn/news.html?aid=1067267> (date of treatment: 10.05.2023).
6. Guo Zeyu. Trends in the development of architecture of waste management facilities in China. [Tendencii razvitiya arhitektury musoropererabatyvayushih obyektov]. LXXVI Regional Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2023. No.4. Pp. 45–49. (rus)
7. Du Xiangfei., Shu Pingzeng. A brief discourse on the deindustrialization transformation of power plant buildings [Kratkaya diskussiya o deindustrializatsionnoy transformatsii zdaniy elektrostantsiy]. Theoretical Research on Urban Construction. 2018. No.24. Pp. 60–61.
8. Wang Dapeng. "Deindustrialization" of the industrial architectural project on the example of several projects of waste-fired power plants [«Deindustrializatsiya» promyshlennogo arkhitekturnogo proekta na primere neskol'kikh proektov elektrostantsiy. rabotayushchikh na otkhodakh]. Book City. 2018. No. 6. Pp. 79–86.
9. Bao Yaxian. Discussion of the project of power plant for incineration of household waste [Ob-suzhdenie proekta elektrostantsii po szhiganiyu bytovykh otkhodov]. Environmental Engineering. 2012. No.6. Pp. 118–121.
10. Anle, Yang Zhihui., Zhou Yahui. The method of deindustrialization of architectural design [Metod deindustrializatsii arkhitekturnogo proektirovaniya]. Journal of Wuhan University. 2017. No.11. Vol. 50. Pp. 78–82.
11. Tong Xueyin. Analysis and research of "deindustrialized" methods of industrial building design [Analiz i issledovanie «deindustrialnykh» metodov proektirovaniya promyshlennykh zdaniy]. Chemical Industry Management. 2018. No.2. Pp. 179–180. DOI:10.3969/j.issn.1008-4800.2018.05.145.
12. Li Shiping. A brief discussion of environmental management in waste incineration power plants [Kratkaya diskussiya ob upravlenii okhranoy okruzhayushchey sredy na musoroszhigatelnykh elektrostantsiyakh]. Management and Technology of Small and Medium Enterprises (first issue). 2018. No. 7. Pp. 12–13. DOI:10.3969/j.issn.1673-1069.2018.19.
13. Guo Zeyu, Supranovich V.M. Functional-planning organization of waste incineration power plants in China. [Funktsionalno-planirovochnaya organizatsiya musoroszhigatelnykh elektrostantsiy v kitae]. Collection of scientific papers of the Department of Architectural Design for 2022-2023. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2023. No.5. Pp. 41–45. (rus) DOI:721.011.12/725.4.

14. Zhang Li. Analysis of environmental pollution sources and prevention and control measures in waste incineration power plants [Analiz istochnikov zagryazneniya okruzhayushchey sredy. a takzhe mery po predotvrashcheniyu i kontrolyu na musoroszhigatelnykh elektrostantsiyakh]. Guangzhou Chemical Industry. 2018. No.46. Vol.09. Pp. 63–64. DOI:10.3969/j.issn.1001-9677.2018.09.03.

15. Li Gentao. Design of facades of industrial buildings in a new environment [Dizayn fasadov promyshlennykh zdaniy v novoy srede]. Building materials and finishing. 2018. No.8. Vol.85. Pp. 112–113. DOI:10.3969/j.issn.1673-0038.2018.35.067.

16. Meng Songqin. Discussion about the project of deindustrialization of the external facade of a waste incineration power plant [Diskussiya o proekte deindustrializatsii vneshnego fasada musoroszhigatelnoy elektrostantsii]. Shandong Industrial Technologies. 2018. No.10. Vol.32. Pp. 107–108. DOI:10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.10.098.

17. Liao Yibin., Sun Hu., Wang E. On the “deindustrialization” of architectural planning and design [O «deindustrializatsii» arkhitekturnogo planirovaniya i proektirovaniya]. Research in the theory of urban construction. 2019. No. 7. Pp. 90–91. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.201907079

18. Li Yun. Analysis of environmental protection measures at urban waste incineration power plants [Analiz prirodookhrannykh meropriyatiy na

gorodskikh musoroszhigatelnykh elektrostantsiyakh]. Bohai Rim Economic Outlook. 2017. No.7. Pp. 122–123.

19. Ren Qun. Study of a city waste incineration power plant [Issledovanie gorodskoy musoroszhigatelnoy elektrostantsii]. Xi'an University of Architecture and Technology. 2014. No.5. Pp. 65–66. DOI: 10.7666/d.y616794.

20. Yu Ying., Xu Junjian., Shen Chunyan. Project and concept of deindustrialization of the Huaneng Changxing power plant [Proekt i kontseptsiya deindustrializatsii elektrostantsii Khuanen Chansin]. Architecture of Zhejiang. 2013. No.9. Pp. 10–11.

21. Zhu Hao. Optimal design strategy for new resource thermal power plants from the point of view of public participation (D) [Optimalnaya strategiya proektirovaniya novykh resursnykh teploelektrostantsiy s tochki zreniya uchastiya obshchestvennosti (D)]. Guangzhou: South China University of Technology. 2020. No.5. Pp. 66–68.

22. Shamaeva T.V. Sustainable development of the architectural appearance of industrial facilities using the example of foreign experience [Ustoychivoe razvitie arkhitekturnogo oblika promyshlennykh obektov na primere zarubezhnogo opyta]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No.12. Pp. 46–61. (rus) DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-46-61

Information about the authors

Guo Zeyu. Postgraduate student. E-mail: mc172839456@gmail.com. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received 19.11.2023

Для цитирования:

Го Цзэюй. Принципы функционально-планировочной организации мусоросжигательных электростанций в Китае // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 56–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-56-65

For citation:

Guo Zeyu. Principles of functional-planning organization of incineration power plants in China. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 56–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-56-65

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-66-75

Петухова Н.М., Жоркина Д.Г.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет***E-mail: Petukhova.n.m@lan.spbgasu.ru*

АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКИХ ПОСТРОЕК НАЧАЛА XX ВЕКА С ЗАМКНУТЫМИ ДВОРОВЫМИ ПРОСТРАНСТВАМИ В Г. ТАМБОВЕ

Аннотация. В статье описывается процесс формирования нового элемента городской планировочной структуры, закрытого двора, сформировавшегося в конце 19 – начале 20 века. Для исследования данной темы проводится анализ трех исторических построек с замкнутыми дворовыми пространствами, расположенных в г. Тамбове, среди них: доходный дом В. В. Галкина, доходный дом М. В. Асеева и доходный дом К. И. Турчанинова.

Также в статье доказывается схожесть их конфигураций с доходными домами Санкт-Петербурга: доходного дома Ф. И. Лидваля, доходного дома Г. Г. фон Голи и доходного дома А. Н. Перцова, возведенными в тот же временной период, выявляются причины и предпосылки для формирования дворовых пространств единого типа в конце 19 – начале 20 века.

Помимо этого, в статье поднимается вопрос о необходимости внесения комплекса построек доходного дома М. В. Асеева, расположенных по адресу г. Тамбов, ул. М. Горького, 49, в реестр ОКН. В качестве доказательства о необходимости внесения объектов в реестр описываются ценностные характеристики ансамбля доходного дома М. В. Асеева.

Ключевые слова: двор, дворовое пространство, объект культурного наследия, доходный дом, Тамбов.

Введение. Целью работы является обоснование необходимости комплексного подхода к сохранению исторической застройки с замкнутыми дворовыми пространствами в г. Тамбове.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выявление причин и предпосылок для создания замкнутых дворовых пространств.
2. Анализ трех объектов исторической застройки с замкнутыми дворовыми пространствами в г. Тамбове
3. Выявление ценностных характеристик ансамбля доходного дома М. В. Асеева для внесения объекта в реестр ОКН.
4. Сравнительный анализ доходных домов г. Тамбова и г. Санкт-Петербурга.

Данное исследование на сегодняшний день особенно важно, так как все перечисленные объекты в г. Тамбове нуждаются в проведении реставрационных работ. Для создания проекта их реставрации необходим комплексный подход. Важна работа не с отдельным историческим зданием, а с градостроительным контекстом, в котором возводился объект, поэтому особенно важно понимать причинно-следственную связь возникновения той или иной городской планировочной структуры.

У Тамбова есть большой потенциал для изучения темы строительства объектов с замкнутыми дворовыми пространствами, однако данная тема на сегодняшний день остается мало изученной. К работам, носящим общий, контекстуаль-

ный для нашего исследования, характер, относится работа, где описывается процесс формирования дворов на Тамбовщине, начиная с XVII в. до начала XX в. (Панков С.В. Исторические особенности дворовой планировки на Тамбовщине). Работы, посвященные исследуемым в данной работе дворовым пространствам, не проводились. Также отсутствуют исследования, в которых проводится параллель между перечисленными в статье объектами исторической застройки в Тамбове и Санкт-Петербурге. В целом история архитектуры города Тамбов мало популяризирована как среди обывателей, так и среди представителей научных сообществ.

Работа может иметь практическое применение, для создания проекта реконструкции или реставрации объектов исторической застройки необходимо понимание формирования градостроительной ситуации. Это обеспечивает комплексный гуманный подход к вопросу сохранения наследия. Также остро стоит вопрос внесения комплекса построек доходного дома М. В. Асеева в реестр ОКН, объект нуждается в применении мер по предотвращению его разрушения.

Материалы и методы. В основу исследования положены историко-библиографические сведения об объектах с замкнутыми дворовыми пространствами г. Тамбова и Санкт-Петербурга, проводились архивные и натурные исследования по данной теме.

В качестве методов исследования применяется сравнительный анализ на основе изучения объектов исторической застройки с замкнутыми

дворовыми пространствами, расположенных в городах Тамбов и Санкт-Петербург.

Основная часть. Возникновение закрытых дворов в России связано с возникновением в конце XIX века в Петербурге и Москве специфического типа доходного дома с затемненными дворами-колодцами, рассчитанного на плотную периметральную застройку квартала. Постепенно данная тенденция в строительстве начала распространяться в провинциальных городах. Тамбов был не исключением [1].

Тенденция строительства закрытых дворов наблюдалась и в усадебном строительстве: к XIX веку на Тамбовщине стал преобладать «круглый двор», который замыкал внутри себя все усадебные строения (рис. 1).

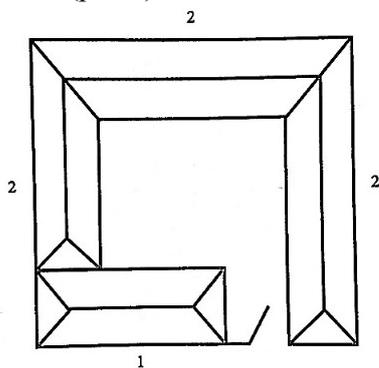


Рис. 1. Вариант «круглого двора» в Тамбовской губернии 19 века.

1 – жилой дом; 2 – хозяйственные постройки [2]

В дальнейшем такой тип планировки стал активно использоваться во времена развития строительства доходных домов с целью максимальной капитализации владельцами земельного участка. В России доходные дома появились в начале XIX в., а уже к началу XX в. на долю доходных домов, к примеру, в Петербурге приходилось до 80 % от построенных жилых зданий, в Москве – до 40% жилой недвижимости. Доходные дома представляли собой многоквартирные жилые дома, находящиеся в частной собственности владельца. Квартиры в них сдавались внаем. Помимо квартир, на первых этажах доходных домов зачастую располагались магазины и конторы [3].

Налог с такого бизнеса приносил большую прибыль в городские бюджеты. В связи с процессами урбанизации, появлением свободных капиталов доходные дома получили распространение по всей России. В Тамбове же в начале XX в. крупным домовладельцам, среди которых были: Аносовы, Асеевы, Можаров, Толмачевы, принадлежало сразу несколько доходных домов. Планировочная структура таких домов, их этажность, стилистика изменялись в зависимости от расположения в городской структуре (центр, окраины),

назначения (доходный, ночлежный дом), расположения в квартале (рядовое, угловое), градостроительной формы участка (прямоугольная, колодцевая, Н-, Г-, П-образная).

В некоторых районах г. Тамбова такие дома сохранились и на сегодняшний день формируют кварталы исторического центра города, отражают передовые тенденции архитектуры периода конца XIX – начала XX вв.

В Тамбове существует проблема сохранения и поддержания исторических зданий в надлежащем состоянии. В мировой реставрационной практике существует множество примеров, олицетворяющих некомпетентный подход к вопросу сохранения исторического фонда.

Одним из факторов, способствующих успешному решению вопроса сохранения исторической застройки, является комплексный подход, подразумевающий предпроектный градостроительный анализ, а также анализ формирования исторической среды. Изучение градостроительных тенденций различных исторических периодов позволяет выявить принадлежность того или иного объекта к комплексу построек и, как следствие, избежать неточностей в создании реставрационных решений, а также доказывает необходимость сохранения исторического объекта, возведенного в комплексе с соседствующими зданиями.

В данной статье проанализируем сохранившиеся постройки в г. Тамбове с замкнутыми внутренними дворами. В рамках анализа были рассмотрены три объекта. Все они играют большую роль в формировании исторического облика г. Тамбова, являясь отражением целого периода в истории архитектуры: в них заложены тенденции строительства первого десятилетия XX века.

1. Доходный дом инженера-строителя В. В. Галкина, который служил старшим штатным контролером первого окружного акцизного управления Тамбовской губернии. Дом расположен на улице Августа Бебеля (Киркинской), 28, был построен его же владельцем в конце первого десятилетия XX века (рис. 2).

В плане дом представляет собой замкнутый прямоугольник. Двор сформирован двух- и одноэтажными домами, примыкающими друг к другу в торцах. С северной и южной стороны двор имеет сквозные арочные проезды. Со стороны главного, асимметричного, согласно канонам стиля модерн, фасада въезд во двор закрывался коваными воротами (рис. 3).

Пройдя через арку, обыватель попадает во внутренний двор, он визуально напоминает архитектуру западноевропейского города: крутые скаты крыш, обилие красного кирпича в сочетании со штукатуркой [5].

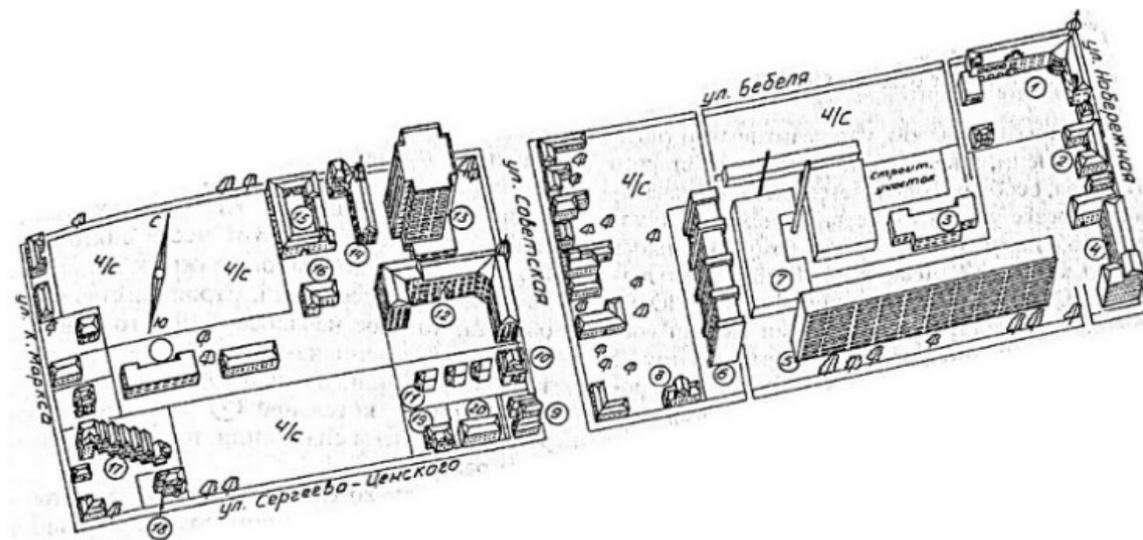


Рис. 2. Карта-схема в изометрической проекции. Дом 15 [3]



Рис. 3. 1 – Главный фасад и планы этажей доходного дома В. В. Галкина [4]; 2 – Въездные ворота во двор



Рис. 4. Снимок доходного дома В. В. Галкина 1978 г. и 2023 г. [6]

Вероятно, такая архитектура обусловлена тем, что улица Киркинская всегда была связана с немецкой диаспорой: здесь располагалась лютеранская церковь, а также на месте современного завода «Комсомолец» находилось производство

газированных фруктовых вод и пива «Новая Бавария», принадлежавшее немке Маргарите Фёдоровне Леймер.

В правом крыле располагалось жильё, сдаваемое в наем, а в левом – комплекс амбаров для нужд дворника и квартирантов. В них хранили

повозки и сани. Под окнами устроены палисады [7].

В доме, помимо семьи самого домовладельца, проживали: агроном губернского управления земледелия С. Г. Ананьин, бухгалтер Тамбовского отделения Волжско-Камского банка А. С. Ашуркин, землевладелец П. С. Ефанов. В годы советской власти здесь также проживали известные в городе лица. В их числе были семьи преподавателя музучилища, композитора А. А. Полторацкого и тамбовского врача А. В. Лебедева, который был одним из первых врачей, удостоенных звания заслуженного врача РСФСР. Его семья оказывала помощь расположенному на противоположной стороне улицы училищу для слепых детей. Дочь Лебедева, Татьяна, в 1930 году закон-

чила графический факультет Московского художественного института. Будучи художницей, она создала галерею портретов рабочих завода «Комсомолец», расположенного неподалеку, написала портреты заслуженного врача П. В. Быстрова, директора музыкального училища М. Н. Реентовича, иллюстрировала произведения Ф.М. Достоевского. [8].

На сегодняшний день объект сохранил свою жилую функцию [9]. Внесен в список объектов культурного наследия регионального значения как «Жилой комплекс: три жилых дома; сарай; ворота» решением Тамбовского облисполкома от 03.11.1989 № 293 [10].

Дома с подобной планировкой дворового пространства располагаются на улице Максима Горького (Араповская) (рис. 5) [11].

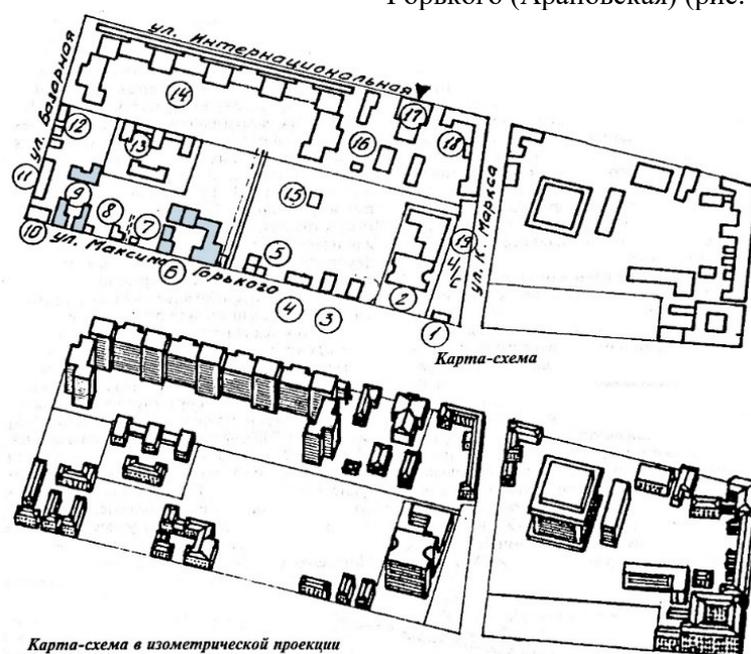


Рис. 5. Карта-схема ул. М. Горького в границах ул. К. Маркса и Базарной
6 – М. Горького, 49, доходные дома М. В. Асеева;
9 – М. Горького, 41, усадьба Турчанинова К. И. [12]

Они были построены в то же время, что и доходный дом Галкина.

2. Рассмотрим доходные дома М. В. Асеева, расположенные по адресу М. Горького, 49 (рис. 6.).



Рис. 6. Снимки дворового пространства доходного дома М. В. Асеева 2023 г.

В 1909 г. известный тамбовский фабрикант М. В. Асеев приобрел участок на ул. Араповской (нынешней ул. Максима Горького), на которой вскоре начал строительство трех деревянных двухэтажных домов, обложенных кирпичом, формирующих в плане внутренний двор в виде замкнутого «каре» (периметральная застройка). Первые два дома были построены в том же, 1909 году, а третий был достроен лишь к 1911 году. В декабре 1912 года фабрикант продал дома своему однокашнику по Московскому университету, врачу А. И. Петэну, который с 1892 г. заведовал больницей при суконной фабрике торгового дома «Братья М. и В. Асеевы» в г. Рассказове.

Дома были снабжены водопроводом, канализацией, электроосвещением. В каждой из 8

квартир были оборудованы ванные комнаты, что говорит о том, что здесь могли позволить себе проживание лишь состоятельные люди. В доме жили такие именитые люди, как сам А. И. Петэн, а также прокурор окружного суда Д. Б. Федосеев и другие именитые чиновники [13].

После национализации доходных домов, была произведена их перепланировка, в результате которой дома стали разбиты на 28 квартир и лишены прежних удобств.

Дома не признаны объектами культурного наследия, однако по своей исторической и архитектурной ценности могли бы претендовать на статус ОКН (табл. 1).

На сегодняшний день дома заселены.

Таблица 1

Ценностные характеристики ансамбля доходного дома М. В. Асеева

Ценностные характеристики	Описание
Историческая	В доходных домах М. В. Асеева проживали сестры великого композитора С. В. Рахманинова, который бывал у них в гостях, а также здесь бывала М. А. Спиридонова.
Архитектурная	Архитектурные решения построек являются несут в себе память о тенденциях в строительстве начала XX века.
Градостроительная	Сохранена характерная для того времени градостроительная структура доходных домов.
Социально-культурная	Уникальное для Тамбова взаиморасположение построек формирует двор, выступающий в качестве общественного пространства.

3. Следующий пример организации замкнутого дворового пространства находится по адресу М. Горького, 41 – бывшая усадьба Турчанинова К. И. (рис. 7) [14].



Рис. 7. Снимок усадьбы К. И. Турчанинова 2023 г.

Дворовое пространство организовано следующим образом: два деревянных дома, обложенные красным кирпичом, выходят фасадами на улицу, а третий стоит в глубине двора. Его нижний этаж выполнен из кирпича, а верхний – из дерева, украшенный резными элементами. Усадебный комплекс включал в себя: усадебный дом,

дворовый флигель, домик привратника, каретный сарай и конюшни.

Барин не всегда проживал здесь, он имел дом на улице Набережной, а бывшую усадьбу использовал, как доходный дом. Комплекс усадебных построек был поделен более чем на 40 квартир.

Въезд во двор оформлялся воротами с ажурной металлической решеткой.

В доходном доме были обеспечены все удобства для постояльцев: в строении, расположенном с левой стороны от въезда во двор, была расположена баня, в подвальном помещении – общая кухня. За домами, далеко в глубь квартала был высажен яблоневый сад. Во времена своего существования этот доходный дом был особенно привлекателен для арендаторов по качеству удобств, предоставляемых жильцам.

Здесь проживали двоюродные сестры композитора С. В. Рахманинова, М. А. Турчанинова и Л. А. Вибор. Рахманинов периодически бывал у них в гостях.

Существует версия, что в этом доме в начале XX в. была еврейская молельня. В 1918 г. в этом доме нашла свой последний приют Александра Алексеевна – жена Бориса Николаевича Чичерина, одного из основоположников конституционного права России.

Сюда же приезжала одна из известнейших политических деятелей, революционерка, лидер партии левых эсеров, М. А. Спиридонова, так как в одной из квартир проживала ее хорошая знакомая, служившая экономкой у Турчаниновых [15].

В 1951 г. был проведен ремонт данных построек. Дата проведения ремонта была нанесена на фасад одного из домов, и до сегодняшнего дня провоцирует споры о дате строительства объекта [16].

На сегодняшний день все постройки усадебного комплекса являются жилыми, они внесены в реестр ОКН в составе объекта культурного наследия регионального значения «Усадьба М.А. Турчаниновой: главный усадебный дом; дворовый флигель; домик привратника; каретный сарай и конюшня», г. Тамбов, ул. М. Горького, 41 (Постановление Администрации Тамбовской области от 10.08.1993 №280) [17].

На сегодняшний день все перечисленные объекты нуждаются в проведении реставрационных работ. Однако, стоит учитывать, что для создания проекта их реставрации необходим комплексный подход. Важна работа не с отдельным историческим зданием, а с градостроительным контекстом, в котором возводился объект.

Выводы

1. Все три рассматриваемых в статье объекта построены в один и тот же временной период, дата их строительства относится к началу XX века. Все они имеют схожее градостроительное планировочное и объемно-пространственное решение, что вызвано схожей градостроительной ситуацией – делением на владельческие участки,

которые застраивались наиболее плотно, чтобы максимально капитализировать землю.

2. Сравнительный анализ доходных домов начала XX века Тамбовской губернии и Санкт-Петербурга показал, что в Тамбове, как и в Санкт-Петербурге, в основе градостроительной структуры доходных домов лежит базовый модуль – владельческий участок, что, с учетом создания условий для максимальной монетизации выделенных под застройку участков, привело к схожим градостроительным планировочным решениям (табл. 2).

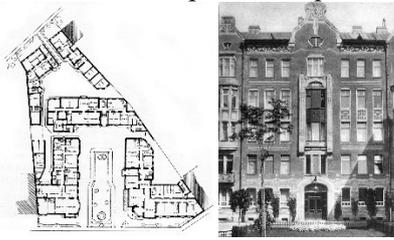
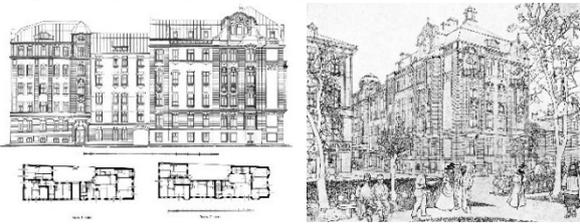
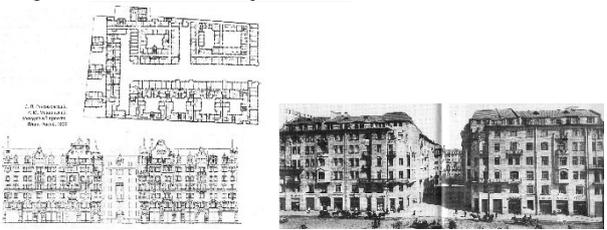
3. Анализируемые доходные дома имеют схожие конструктивные особенности: дома преимущественно двухэтажные с несущими стенами из глиняного кирпича, перекрытия деревянные, торцевые стены глухие, выполненные из огнеупорного кирпича (такое решение позволяло делать сплошную застройку улиц), крыша у всех объектов двускатная с деревянной стропильной системой.

4. Анализ архитектурных решений объектов показывает, что преимущественно доходные дома того времени строились в стиле модерн с учетом региональных особенностей. В процессе строительства использовались схожие материалы: дерево, красный глиняный кирпич. В качестве материала для создания декора на всех трех объектах используется штукатурка, покрывающая кирпичные орнаменты. В облицовке каждого из объектов используется ритмический ряд горизонтальных и вертикальных членений, наблюдаются схожие метрические и масштабные признаки. Обильное использование дерева в строительстве обусловлено региональными особенностями: Тамбовская область всегда имела богатые леса. По этой причине город долгое время состоял лишь из деревянных построек. Однако страшные пожары, происходившие на Тамбовщине с 1860-1864 гг., во время которых сгорел 207531 двор, изменили существующие долгие годы тенденции в строительстве. Начали возводить каменные здания, а дерево стали обкладывать кирпичом.

5. Необходимо внесение комплекса построек доходных домов М. В. Асеева в реестр ОКН регионального значения, так как объект обладает рядом ценностных характеристик, учитывающихся при постановке памятника на государственную охрану, согласно ФЗ от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 20.10.2022) "Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 11.01.2023).

Таблица 2

Градостроительная структура доходных домов, в основе которой лежит базовый модуль – владельческий участок

Тамбовская губерния	Санкт-Петербург
<p>Доходный дом инженера-строителя В. В. Галкина Архитектор: В. В. Галкин Дата постройки: 1910 г. Адрес: А. Бебеля, 28</p> 	<p>Доходный дом Лидваля Архитектор: Ф. И. Лидваль Дата постройки: 1899 – 1904 гг. Адрес: Каменноостровский пр., 1-3/15</p> 
<p>Доходные дома М. В. Асеева Архитектор: – Дата постройки: 1909 – 1911 гг. Адрес: М. Горького, 49</p> 	<p>Доходный дом Г. Г. фон Голи Архитектор: Г. Г. фон Голи Дата постройки: 1902 – 1903 гг. Адрес: Кронверкский пр., 61/28</p> 
<p>Доходный дом Турчаниновых Архитектор: – Дата постройки: нач. XX в. Адрес: М. Горького, 41</p> 	<p>Доходный дом А. Н. Перцова Архитектор: <u>С. П. Галензовский</u>, И. Ю. Мощинский Дата постройки: 1910 – 1912 гг. Адрес: <u>Лиговский проспект</u>, 44</p> 
<p>Вывод: в результате анализа градостроительной структуры доходных домов начала XX века Тамбовской губернии и Санкт-Петербурга, можно сделать вывод, что при проектировании архитекторы руководствовались необходимостью создания условий для максимальной монетизации выделенных под застройку участков. Анализ архитектурных решений объектов показывает, что преимущественно доходные дома того времени строились в стиле модерн с учетом региональных особенностей.</p>	

Ансамбль доходных домов М. В. Асеева является объектом, обладающим историко-архитектурной, художественной, научной и мемориальной ценностью, имеющим особое значение для истории и культуры Тамбова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев А.В. Социокультурная эволюция городского двора как общественного пространства // Журнал «Вестник» Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. 2018. № 2. С. 32–39.

2. Панков С.В. Исторические особенности дворовой планировки на Тамбовщине // Проблемы стратегии регионального развития: материалы II Всеросс. науч. конф. Тамбов: Изд-во ТГУ им. Г. Р. Державина. 2007. С. 83–87.

3. Даняева Л.Н., Архитектурно-композиционное и типологическое формирование жилых зданий на примере доходных домов середины XIX – XX вв. // Новгород: ННГАСУ, 2020. 182 с.

4. Горелов А.А., Шукин Ю.К. Тамбов: Справочник-путеводитель (южная часть) // Тамбов: Пролетар. Светоч. 2000. 245 с.

5. Леденева Г.Л. Гражданская архитектура российской провинции конца XIX – начала XX столетий (на примере застройки г. Тамбова) // Изд-во ФГБОУ ВПО «БГТУ». 2015. 92 с.

6. Дом инженера Галкина [Электронный ресурс]. URL: <https://top68.ru/articles/society/2015-07-15/dom-inzhenera-galkina-80667> (дата обращения: 12.01.2023)

7. Юстова Е.И., Максимов М.М. Тамбов. Памятники архитектуры // Воронеж, Центр.-Черноземное кн. изд-во. 1979. С. 83–112.

8. Кученкова В.А., Неизвестный Тамбов // Тамбов. 1993. 222 с.

9. Ильин А.Ю., Тамбовская энциклопедия // Центр поддержки музейного дела «Провинциальные усадьбы». 2020. 1016 с.

10. Прогулки по старому Тамбову // Иллюстрир. Путеводитель. 2011. 114 с.

11. Список объектов культурного наследия регионального значения, расположенных на территории Тамбовской области [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. URL: https://pam.tmbreg.ru/assets/files/ReestrOKN/Regional_OKN.pdf (дата обращения: 15.01.2023)

12. Муравьев Н.В., Улицы и площади Тамбова // Тамбов: Взгляд. 1994. 376 с.

13. Горелов А.А., Шукин Ю.К. Тамбов: Справочник-путеводитель (центральная часть) // Тамбов: Пролетар. светоч. 1999. 193 с.

14. Улицы Тамбова: Максима Горького (бывшая Араповская) [Электронный ресурс]. URL:

http://patriot.taminfo.ru/spravka/ulici_tambova/395-maksima-gorkogo-byvshaya-arapovskaya.html (дата обращения: 15.01.2023)

15. Старинный дом Турчаниновых обследуют следователи [Электронный ресурс]. URL: <https://tamlife.ru/informaciya/ob-shhestvo/2019061911121230528.html/starinnyj-dom-turchaninovyh-obsleduyut-sledovатели/> (дата обращения: 15.01.2023)

16. Усадьба М. А. Турчаниновой [Электронный ресурс]. URL: <https://ruskontur.com/usadba-m-a-turchaninovej/> (дата обращения: 15.01.2023)

17. АКТ государственной историко-культурной экспертизы проектов зон охраны объектов культурного наследия регионального значения «Усадьба М.А. Турчаниновой: главный усадебный дом, дворовый флигель, домик привратника, каретный сарай и конюшня» (г. Тамбов, ул. М. Горького, 41), 214 «Усадьба городская: главный дом; флигель» (г. Тамбов, ул. Интернациональная, 30) [Электронный ресурс]. URL: https://pam.tmbreg.ru/assets/files/Ekspertiza/Akt_GIKE_PZO_Tambov_M_Gorkogo_41.pdf (дата обращения: 15.01.2023)

Информация об авторах

Петухова Нина Михайловна, доцент кафедры «Реконструкция и реставрация архитектурного наследия», кандидат искусствоведения. E-mail: Petukhova.n.m@lan.spbgasu.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». Россия, 190013, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Жоркина Дарья Григорьевна, магистрант кафедры «Реконструкция и реставрация архитектурного наследия». E-mail: dzhorkina@mail.ru. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». Россия, 190013, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Поступила 10.05.2023 г.

© Петухова Н.М., Жоркина Д.Г., 2024

***Petukhova N.M., Zhorkina D.G.**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**E-mail: Petukhova.n.m@lan.spbgasu.ru*

ANALYSIS OF HISTORICAL BUILDINGS OF THE BEGINNING OF THE XX CENTURY WITH CLOSED YARD SPACES IN THE CITY OF TAMBOV

Abstract. This article describes the process of forming a new element of the urban planning structure, the closed courtyard, which was formed in the late 19th – early 20th century. To study this topic, an analysis is made of three historical buildings with closed courtyard spaces located in the city of Tambov, among them: V.V. Galkin's apartment house, M.V. Aseev's apartment house and K.I. Turchaninov's apartment house.

The article also proves the similarity of their configurations with the tenement houses of St. Petersburg: the tenement house of F.I. Lidval, the tenement house of G.G. von Goli and the tenement house of A.N. Pertsov,

built in the same time period, the reasons and prerequisites are revealed for the formation of courtyard spaces of a single type in the late 19th – early 20th century.

In addition, the article raises the question of the need to introduce a complex of buildings for the profitable house of M.V. Aseev, located at Tambov, st. M. Gorky, 49, in the register of OKN. As evidence of the need to include objects in the register, the value characteristics of the ensemble of the profitable house of M.V. Aseev are described.

Keywords: yard, yard space, object of cultural heritage, tenement house, Tambov.

REFERENCES

1. Soloviev A.V. Socio-cultural evolution of the city courtyard as a public space [Sotsiokulturnaya evolyutsiya gorodskogo dvora kak obshchestvennogo prostranstva]. Vestnik Journal of the Ryazan State University. S. A. Yesenina. 2018. № 2. Pp. 32–39. (rus)
2. Pankov S.V. Historical features of courtyard planning in the Tambov region space [Istoricheskie osobennosti dvorovoy planirovki na Tambovshchine]. Problems of the strategy of regional development: materials of the II All-Russian. scientific conf. Tambov: Publishing House of TSU im. G. R. Derzhavin. 2007. pp. 83–87. (rus)
3. Danyaeva L.N., Architectural-compositional and typological formation of residential buildings on the example of apartment buildings in the middle of the XIX – XX centuries [Istoricheskie osobennosti dvorovoy planirovki na Tambovshchine]. Novgorod: NNGASU. 2020. 182 p. (rus)
4. Gorelov A.A., Shchukin Yu.K. Tambov: Guidebook (southern part) [Tambov: Spravochnik-putevoditel (yuzhnaya chast)]. Tambov: Proletar. Svetoch. 2000. 245 p. (rus)
5. Ledeneva G.L. Civil architecture of the Russian province of the late XIX - early XX centuries (on the example of the development of the city of Tambov) [Grazhdanskaya arkhitektura rossiyskoy provintsii kontsa XIX – nachala XX stoletiy (na primere zastroyki g. Tambova)]. Publishing house of FGBOU VPO "TSTU". 2015. 92 p. (rus)
6. House of engineer Galkin [Dom inzhenera Galkina]. URL: <https://top68.ru/articles/society/2015-07-15/dom-inzhenera-galkina-80667> (date of treatment: 12.01.2023) (rus)
7. Yustova E.I., Maksimov M.M. Tambov. Monuments of architecture [Tambov. Pamyatniki arkhitektury]. Voronezh, Central-Chernozemnoye kn. publishing house 1979, pp. 83–112. (rus)
8. Kuchenkova V.A., Unknown Tambov [Neizvestnyy Tambov]. Tambov. 1993. 222 p. (rus)
9. Ilyin A.Yu., Tambov Encyclopedia [Tambovskaya entsiklopediya]. Museum Support Center "Provincial Estates". 2020. 1016 p. (rus)
10. Walks in old Tambov [Progulki po staromu Tambovu]. Illustrated. Guide. 2011. 114 p. (rus)
11. List of objects of cultural heritage of regional importance, located on the territory of the Tambov region [Spisok obektov kulturnogo naslediya regionalnogo znacheniya, raspolozhennykh na territorii Tambovskoy oblasti]. Adobe Acrobat Reader. URL: https://pam.tmbreg.ru/assets/files/ReestrOKN/Regional_OKN.pdf (date of treatment: 15.01.2023) (rus)
12. Muravyov N.V., Streets and squares of Tambov [Ulitsy i ploshchadi Tambova]. Tambov: Vzgl'yad. 1994. 376 p. (rus)
13. Gorelov A.A., Shchukin Yu.K. Tambov: Handbook-guide (central part) [Tambov: Spravochnik-putevoditel (tsentralnaya chast)]. Tambov: Proletar. beacon 1999. 193 p. (rus)
14. Streets of Tambov: Maxim Gorky (formerly Arapovskaya) [Ulitsy Tambova: Maksima Gorkogo (byvshaya Arapovskaya)]. URL: http://patriot.taminfo.ru/spravka/ulici_tambova/395-maksima-gorkogo-byvshaya-arapovskaya.html (date of treatment: 15.01.2023) (rus)
15. The old house of the Turchaninovs is being examined by investigators [Starinnyy dom Turchaninovykh obsleduyut sledovateli]. URL: <https://tam-life.ru/informaciya/obshhestvo/2019061911121230528.html/starinnyy-dom-turchaninovykh-obsleduyut-sledovateli/> (date of treatment: 15.01.2023) (rus)
16. The estate of M. A. Turchaninova [Usadba M.A. Turchaninovoy]. URL: <https://rus-kontur.com/usadba-m-a-turchaninovoj/> (accessed: 15.01.2023) (rus)
17. ACT of the state historical and cultural expertise of projects of zones of protection of cultural heritage objects of regional significance "The estate of M.A. Turchaninova: the main manor house, courtyard wing, gatekeeper's house, carriage house and stable" (Tambov, Gorky str., 41), 214 "The city estate: the main house; wing" (Tambov, Internatsionalnaya str., 30) [AKT gosudarstvennoy istoriko-kulturnoy ekspertizy proektov zon okhrany obektov kulturnogo naslediya regionalnogo znacheniya «Usadba M.A. Turchaninovoy: glavnyy usadebnyy dom, dvorovyy fligel, domik privratnika, karetnyy saray i konyushnya» (g. Tambov, ul. M. Gorkogo, 41), 214 «Usadba gorodskaya: glavnyy dom; fligel» (g. Tambov, ul. Internatsionalnaya, 30)]. Adobe Acrobat Reader. URL: https://pam.tmbreg.ru/assets/files/Ekspertiza/Akt_GIKE_PZO_Tambov_M_Gorkogo_41.pdf (accessed: 15.01.2023) (rus)

Information about the authors

Petukhova, Nina M. Assistant professor of the Department "Reconstruction and restoration of architectural heritage", PhD of Art History. E-mail: Petukhova.n.m@lan.spbgasu.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190013, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Zhorkina, Daria G. Master student of the Department "Reconstruction and restoration of architectural heritage". E-mail: dzhorkina@mail.ru. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 190013, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4.

Received 10.05.2023

Для цитирования:

Петухова Н.М., Жоркина Д.Г. Анализ исторических построек начала XX века с замкнутыми дворовыми пространствами в г. Тамбове // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 66–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-66-75

For citation:

Petukhova N.M., Zhorkina D.G. Analysis of historical buildings of the beginning of the XX century with closed yard spaces in the city of Tambov. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 66–75. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-66-75

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-76-89

Борисов И.Н., Новоселов А.Г., *Никитина М.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: mn111993@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПРИ СИНТЕЗЕ КАЛЬЦИЕВО-АЛЮМОФЕРРИТОВОГО КЛИНКЕРА

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования карбонатных пород известняка, мергеля и мела при синтезе кальцево-алюмоферритного клинкера (КАФК). Приводится анализ структуры карбонатных пород, а также их влияние на физико-химические процессы, протекающие при синтезе кальцево-алюмоферритового клинкера. Изучено фазообразование в температурных интервалах 900–1000 °С и 1100–1200 °С с изотермической выдержкой 20 мин. Подобран режим термической обработки для получения основного фазового состава кальцево-алюмоферритового клинкера. Приводится динамика изменения качественного фазового состава продуктов обжига при различных температурах, начиная от 900 °С и до температуры спекания клинкера 1200 °С, а также количественная характеристика интенсивности образования основных клинкерных фаз. Установлено, что в процессе обжига КАФК в интервале температур 900–1000 °С, сырьевые смеси поэтапно претерпевают ряд физико-химических превращений, основными из которых являются термическая диссоциация CaCO_3 , образование промежуточных фаз (CS , CF , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), в результате разложения сопутствующих минералов и твердофазных взаимодействий, а также начало образования клинкерных соединений CA , C_2AS и C_2F . Предложено использовать для состава известняк-боксит температуру 1150 °С с выдержкой 40–60 минут, мергель-боксит – 1100 °С с выдержкой 30–40 минут и мел-боксит – 1100 °С с выдержкой 30–40 минут.

Ключевые слова: известняк, мергель, мел, боксит, кальцево-алюмоферритный клинкер, моноалюминат кальция, геленит, оксид кальция, карбонат кальция.

Введение. Цементная индустрия является одной из важнейших отраслей промышленности, которая играет важную роль в развитии экономики и инфраструктуры страны [1–2]. С каждым днем она становится все более востребованной и активно развивается, обеспечивая строительство различных объектов и сооружений.

При возведении технических сооружений часто возникает необходимость в использовании специальных видов цемента [3]. Это связано с тем, что рядовой цемент не всегда обладает необходимыми свойствами для создания прочных и долговечных конструкций. Такие цементы могут иметь различные составы и свойства, которые позволяют им применяться в различных условиях и для различных целей. Например, для возведения зданий и сооружений в условиях, где воздействуют кислые или соленые воды необходимо использовать цемент с высокой стойкостью к агрессивным средам [4–6]. А для строительства водохранилищ и гидротехнических сооружений требуется цемент с высокой водостойкостью [7–8]; для возведения массивных бетонных сооружений и при монтаже железобетонных конструкций, цементы, которые с оптимальными показателями расширения [9–12] позволяют компенсировать усадку бетона и предотвратить появление разрушений [13–16].

Любое вяжущее специальное или общестроительное – сложная многокомпонентная система, которая характеризуется фазовым составом и свойствами, а регулируется условиями производства и областью применения. Технологический процесс производства зависит от множества факторов, включая природу используемых сырьевых компонентов [17]. Важным аспектом является структура и дисперсность этих компонентов. Качество и свойства клинкера также зависят от условий обжига и охлаждения, и использования различного рода модифицирующих добавок.

При производстве специального цемента могут быть использованы почти все разновидности карбонатных пород. Но при этом стоит принимать во внимание, что в зависимости от условий образования и структуры они могут отличаться реакционной способностью и оказывать влияние на формирование фазового состава в процессе синтеза.

Целью данной работы было изучить возможность применения различных видов карбонатных компонентов (известняк, мергель, мел) при синтезе кальцево-алюмоферритового цемента. Основными задачами исследования были рассмотреть структуру карбонатных пород, а также их влияние на физико-химические процессы, протекающие при синтезе кальцево-алюмоферрито-

вого клинкера; изучить фазообразование в температурных интервалах 900–1000 °С и 1100–1200 °С с изотермической выдержкой 20 мин; подобрать режим термической обработки для получения основного фазового состава.

Методы, оборудование, материалы. В настоящей работе в качестве исходных сырьевых

компонентов использовались: известняк (Свердловская область), мергель (Краснодарский край), мел (Белгородская область) и боксит (Республика Коми). Химический состав сырьевых компонентов установлен при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 Work-Station со встроенной системой дифракции и представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исходных сырьевых компонентов

Компонент	Содержание оксидов, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	TiO ₂	Пр.	ППП
Известняк	0,2	0,2	0,1	55,0	0,6	0,01	0,1	-	0,1	43,8
Мергель	3,2	0,8	0,2	51,1	3,7	0,02	0,4	0,02	0,2	40,4
Мел	1,2	0,4	0,1	55,5	0,2	0,01	0,1	0,01	0,3	42,1
Боксит	10,6	52,2	21,3	0,2	0,7	0,01	0,3	2,2	0,8	11,7

Определение минералогического и фазового состава сырьевых компонентов, кальцево-алюмоферритового клинкера проводили на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA Thermo

Fisher Scientific, в интервале двойных углов отражения 2θ – 4...64°. Рентгенограммы сырьевых материалов приведены на рисунке 1.

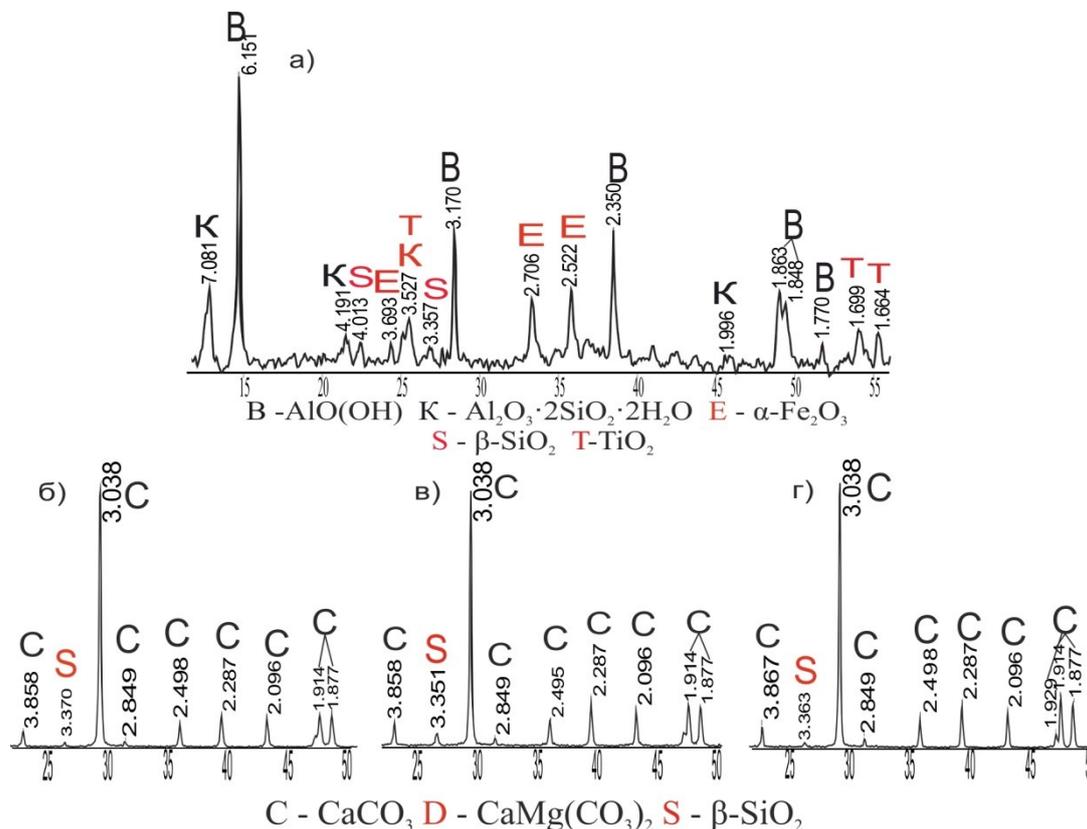


Рис. 1. Рентгенограммы сырьевых компонентов:

а – боксит; б – известняк; в – мергель; г – мел

По полученным результатам рентгенографического анализа с использованием Международной базы данных ICDD (программ Search-Match и Match! 3, и указателя Финка) в используемых сырьевых компонентах наблюдаются следующие минеральные составляющие: для известняка, мергеля и мела – основной минерал кальцит, небольшое количество β-кварц и следы доломита;

для боксита – преимущественное содержание бемита и каолинита, а также присутствуют гематит, β-кварц и анатаз.

Изучение строения и микроструктуры карбонатных компонентов (известняка, мергеля и мела) проводили на электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU (рис. 2).

Термический анализ сырьевых компонентов и смесей в среде аргона проводили на приборе синхронного термического анализа STA 449 F5 фирмы NETZSCH.

Для исследования фазообразования в системе карбонатный – алюминатный компонент

были приготовлены 3 сырьевые смеси, химический состав представлен в таблице 2, где ИБ, ПМерБ, ПМБ – кальцево-алюмоферритовый состав смесей, состоящие из известняка-боксит, мергеля-боксит и мела-боксит в соотношении 1:1.

Таблица 2

Химический состав сырьевых смесей

Идентификатор смесей	Содержание оксидов, %										С/А
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	TiO ₂	Пр.	ППП	
ИБ	5,42	26,16	10,68	27,59	0,65	0,01	0,18	1,12	0,43	27,78	1.05
ПМерБ	6,92	26,50	10,72	25,65	2,19	0,02	0,35	1,13	0,48	26,07	0.97
ПМБ	5,92	26,28	10,71	27,84	0,46	0,01	0,19	1,54	0,75	26,94	1.06

Для получения кальцево-алюмоферритовой смеси сырье предварительно высушивали при температуре 100(±5) °С, время сушки 24 часа, измельчали до содержания фракции ≤ 80 мкм – 95(±2%). После смешивания и гомогенизации компонентов были получены образцы в виде цилиндрических таблеток массой навески 2,5 г, Ø 20 мм, h 3 мм.

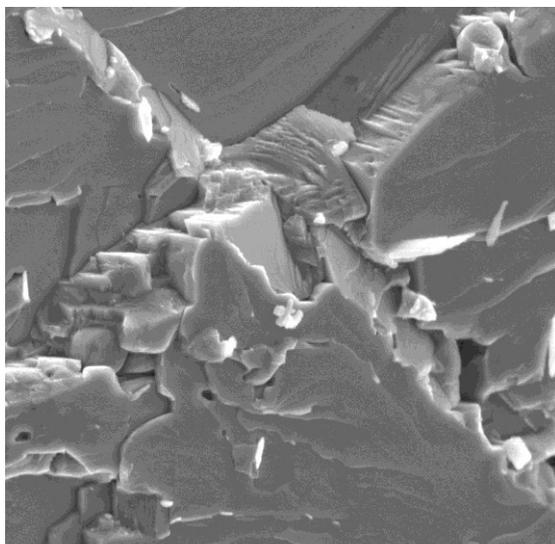
Условия эксперимента: лабораторная печь с нагревателями из карбид кремния, температура синтеза 900–1200 °С (интервал 50 °С), изотермическая выдержка 20 мин, охлаждение воздушное, резкое.

Процесс усвоения оксида кальция оценивали этилово-глицератным методом и с помощью рентгенофазового анализа.

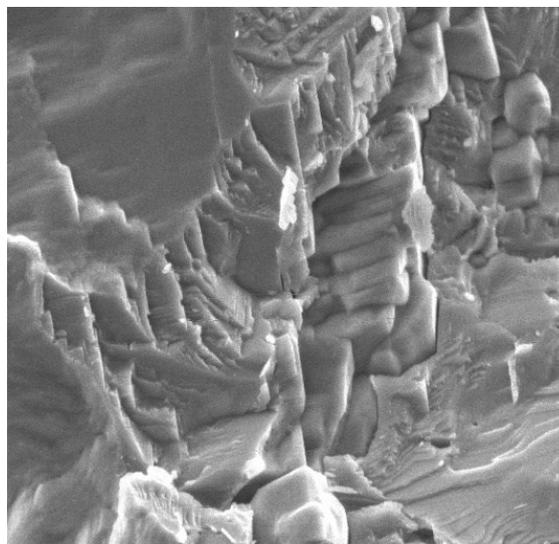
Основная часть. Анализ карбонатных пород.

Известняк месторождения Свердловская область («Михайловский карьер») представляет собой образец светло-серого цвета. Потери при прокаливании породы составляют 43,8 %, содержание CaO – 55,0 %, согласно результатам XRF анализа. В минералогическом составе преобладает карбонат кальция 98,8 %, прочих минеральных составляющих 1,2 %.

Электронно-микроскопический анализ, показал (рис. 2), что известняк по структуре среднекристаллический, частицы хорошо закристаллизованы, дефектны и неоднородны. Наблюдаются поровые пространства размером менее 2 мкм.



View field: 10.00 µm Det: SE MIRA3 TESCAN
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 2 µm
BI: 8.00 WD: 8.76 mm БГТУ им. В.Г. Шухова



View field: 10.00 µm Det: SE MIRA3 TESCAN
SEM HV: 5.0 kV SM: RESOLUTION 2 µm
BI: 8.00 WD: 8.82 mm БГТУ им. В.Г. Шухова

Рис. 2. Микроструктура известняка

Мергель месторождения Краснодарского края представляет собой плотные куски породы темно-серого цвета, высокого титра. Потери при прокаливании составляют 40,4 % и содержание CaO 51,1 % (табл. 1). Из примесных соединений в наличии β - кварц в количестве 3,2 %. По дан-

ным РФА (рис.1, в) основным минералом является кальцит - CaCO₃, его содержание 88,0 %, прочих 4,5 %, имеется различия в микроструктуре породы с другими карбонатными видами сырья, ввиду разных условий образования.

На электронной фотографии (рис. 3) наблюдается, что мергель мелкокристаллический,

имеет смешенную структуру, состоящую из разрушенных коколитов и их частиц, а также кристаллического вида кальцита. Много кристаллов неправильной формы, представляющих собой сростки или мелкие чешуйчатые кристаллы, размером не более 2 мкм.

Мел месторождения Белгородской области, образцы породы белого цвета. Потери при прокаливании составили 42,1 %, содержание CaO – 55,5 % (табл. 1).

При анализе электронных фотографий скола (рис. 4) установлено, что мел на 97,6 % состоит из карбоната кальция (CaCO_3) в виде коколитов и пластин, из которых образуются кокколитофориды - крошечные одноклеточные водоросли, а

также из большого количества разрушенных коколитов и их обломков разной формы, а их размеры не более 5–6 мкм.

По данным дифференциально-термического анализа (рис. 5), температура начала декарбонизации при для известняка составляет 630,8 °С, для мергеля 620,7 °С и мела – 623,7 °С. Эндотермический эффект разложения карбоната кальция в известняке наблюдается при температуре 830,8 °С, для мергеля – 823,8 °С и для мела – 827,7 °С.

Температура окончания процесса декарбонизации для известняка составляет 860,8 °С, для мергеля – 848,8 °С и мела – 851,7 °С. Для карбонатных пород последовательность протекания процесса декарбонизации следующая мергель - мел - известняк (по убыванию).

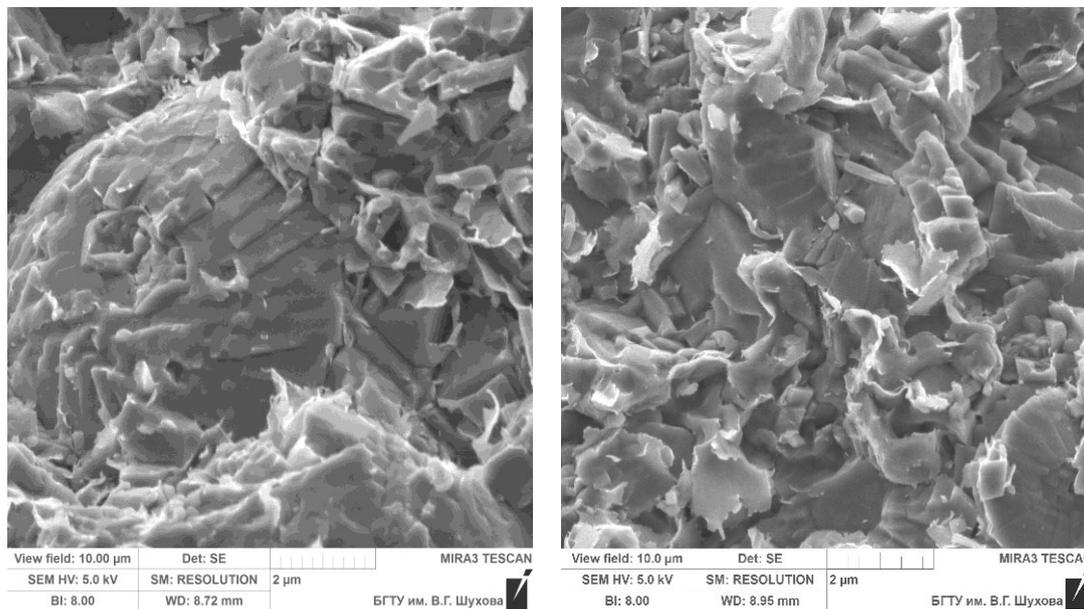


Рис. 3. Микроструктура мергеля

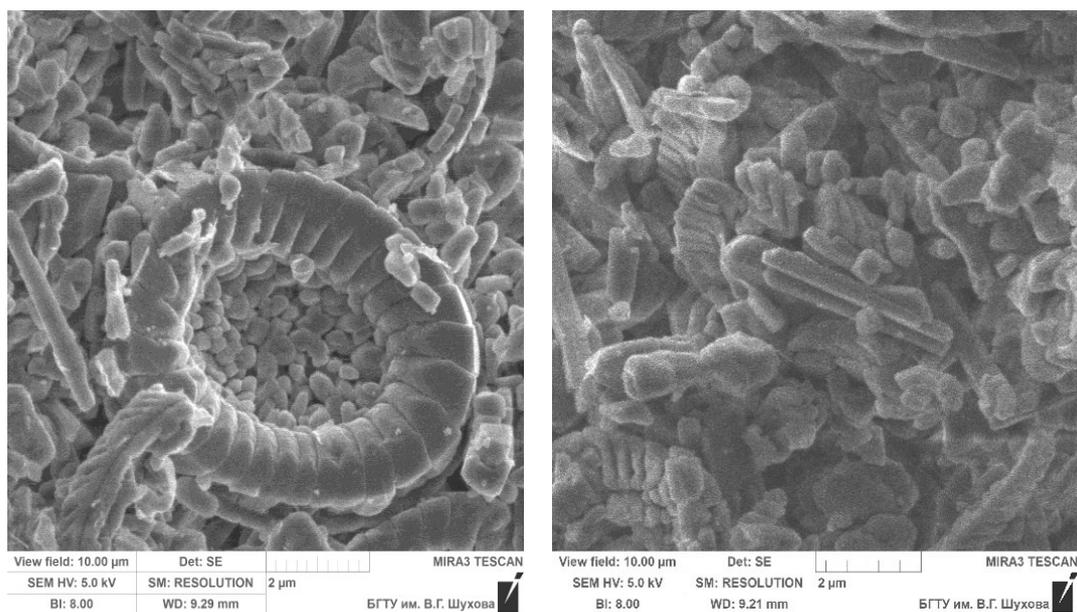


Рис. 4. Микроструктура мела

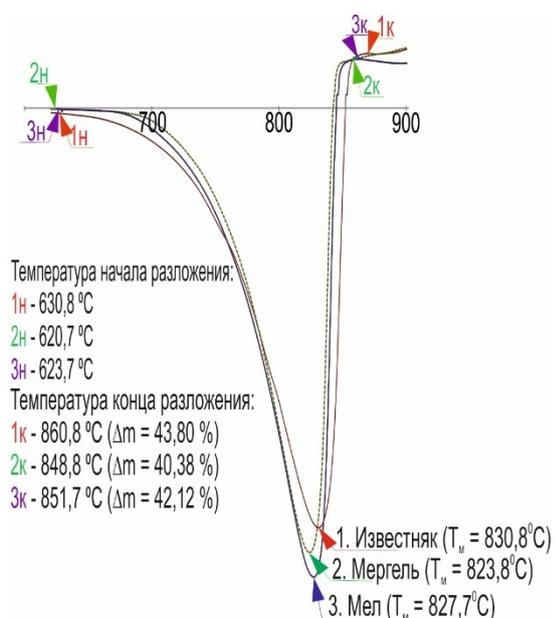


Рис. 5. Термограммы карбонатных пород

На основании полученных результатов, все виды исследуемых карбонатных пород могут быть использованы при синтезе кальцево-алюмоферритового цемента. Отличительной особенностью пород является химический состав и структура минерала, так, например, мергель содержит в составе нежелательный оксид при синтезе КАФЦ – SiO₂ в количестве 3,2 %.

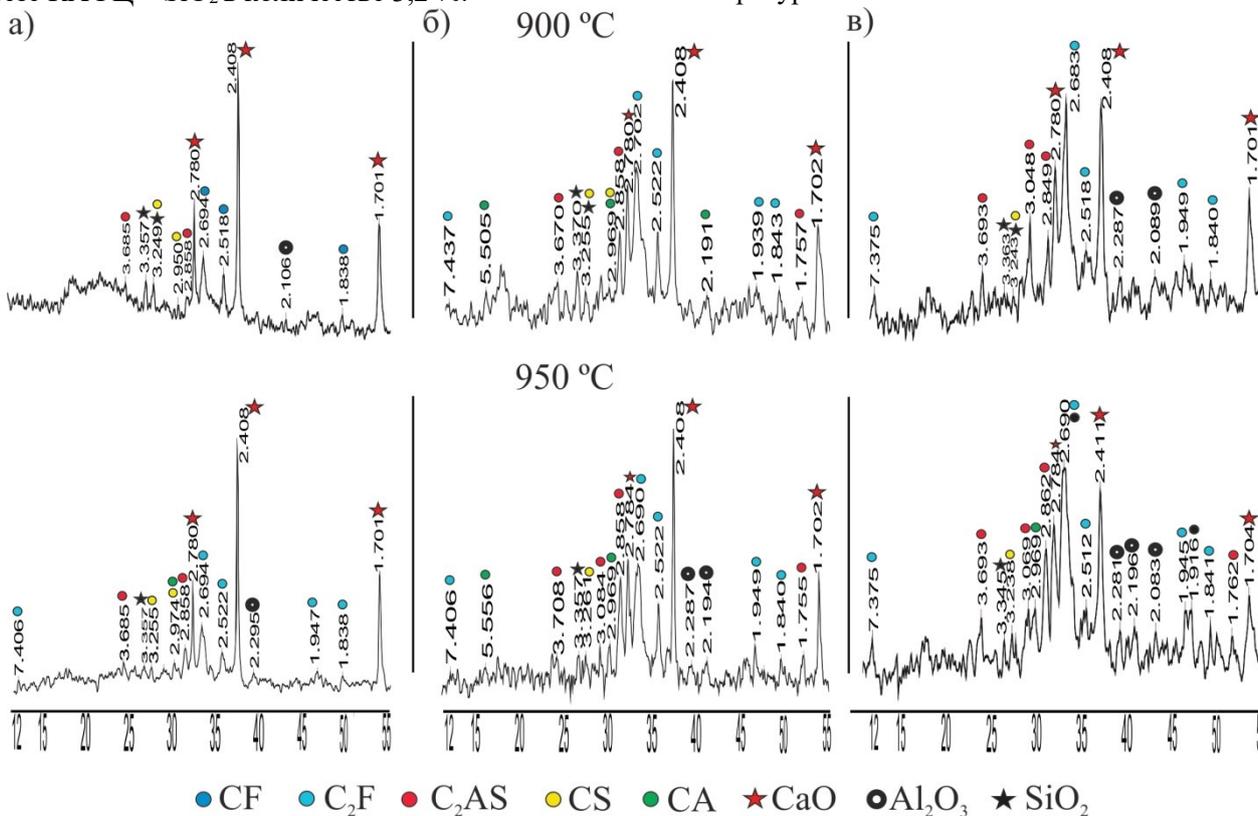


Рис. 6. Фазаобразование в температурном интервале 900–1000 °C:

а) ИИБ; б) ПМерБ; в) ПМБ

Для оценки влияния структуры карбонатных компонентов на формирование фазового состава были рассмотрены 3 фактора. Первым фактором

Особое внимание было оказано термическому процессу разложения карбоната кальция, так как от того, в какой температурной области происходит начало/конец образования CaO, и какой будет структура, зависит весь сложный физико-химический процесс фазообразования.

Для дальнейшего исследования физико-химических реакций, протекающих при нагревании сырьевых смесей на основе разных видов карбонатного сырья, температурные промежутки синтеза условно разделили на две зоны: 1) низкотемпературную, где происходит образование промежуточных (низкоосновных) соединений, за счет преимущественно твердофазовых реакций; 2) высокотемпературную, где формируется непосредственно основной клинкерный состав кальцево-алюмоферритового цемента.

Фазаобразование при нагревании исследуемых сырьевых смесей при температурах 900–1000 °C. Рентгенофазовый анализ образцов, полученных в результате обжига сырьевых смесей в интервале температур 900–1000 °C с шагом в 50 °C, позволяет проследить изменения, протекающие в фазовом составе смесей при нагревании в низкотемпературной области (рис. 6). И способствует представлению механизма формирования промежуточного состава клинкера при температуре 1000 °C.

является образование или усвоение оксида кальция, которое было изучено с помощью аналитических дифракционных отражений $d = 2,41$;

1,70Å. Второй фактор – образование основных клинкерных фаз моноалюмината кальция СА ($d = 2,97 \text{ \AA}$) и других алюминатных фаз (C_3A и $C_{12}A_7$). И, наконец, третий фактор – образование вторичных фаз, таких как C_2AS ($d = 2,85; 1,76 \text{ \AA}$), C_2F ($d = 7,40; 2,69; 1,93; 1,84 \text{ \AA}$) и $C_2(Al,Fe)_2O_5$ ($d = 7,40; 2,69; 2,65; 1,93; 1,84 \text{ \AA}$).

Так, при 900 °С в составах ИИБ и ПМерБ наблюдается большое количество СаО, которое

увеличивается до температуры 950 °С, а при температуре 1000 °С начинает снижаться (рис. 7). Это связано с тем, что в некоторых составах начинаются физико-химические реакции фазообразования промежуточных соединений CS, CF и частично наблюдаются дифракционные максимумы основных и второстепенных соединений – СА, C_2AS , C_2F .

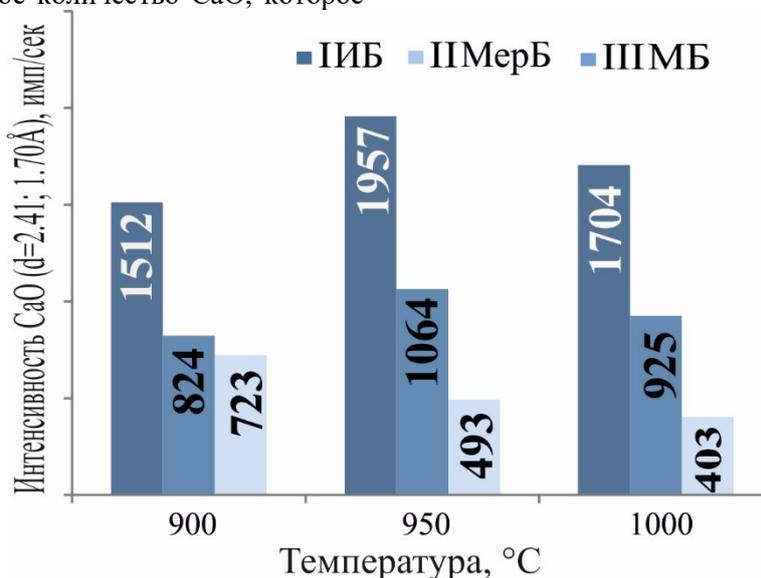


Рис. 7. Интенсивность образования/усвоения СаО

Полученные показатели относительного содержания оксида кальция характеризуют процесс полного разложения карбоната кальция. Так, в составах ИИБ и ПМерБ при 950 °С, в ПМБ при 900 °С. Результаты исследования при ДТА и РФА показали, что температуры диссоциации карбо-

натов в составах ИИБ, ПМерБ и ПМБ различаются на $\Delta 89,2 \text{ °C}$, $\Delta 101,2 \text{ °C}$ и $\Delta 48,3 \text{ °C}$ соответственно. Эти отличия связаны с наличием в смесях других оксидов (Fe_2O_3 , R_2O и др.), которые могут оказывать влияние на скорость процесса декарбонизации.

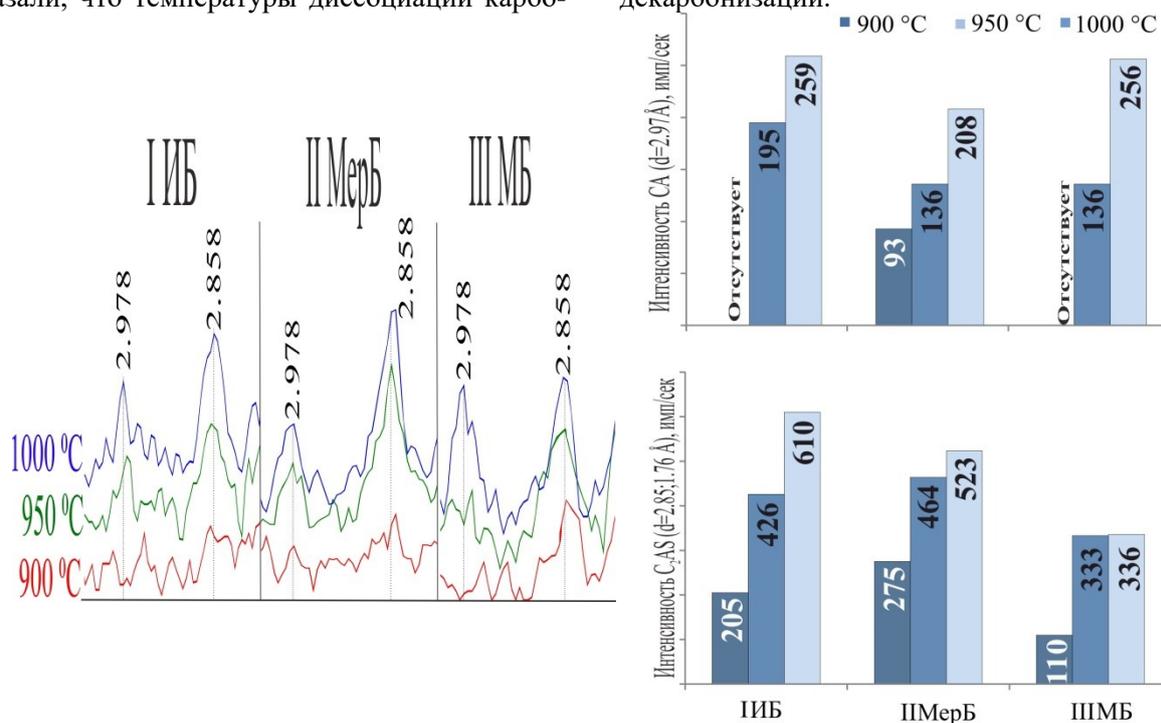


Рис. 8. Рентгенограмма образования фаз СА и C_2AS и интенсивность при температурах 900–1000 °С

Начало образования СА (рис. 8) наблюдается в составе ПМерБ при 900 °С, интенсивность отражения $d = 2.97 \text{ \AA}$ составляет 93 имп/сек, в составах ИИБ и ПМБ при 950 °С.

Дифракционный максимум $d = 2.95 \text{ \AA}$ соответствует фазе метасиликата кальция, который наблюдается на рентгенограмме при 900 °С в составах ИИБ, ПМБ, и последующих температурах

950-1000 °С в составе ИИБ. Образование геленита C_2AS происходит при 900 °С во всех составах, наибольшее содержание в ПМерБ – 275 имп/сек. Ферритная фаза C_2F ($d = 7,44; 2,70; 2,52; 1,94; 1,84 \text{ \AA}$) отмечается в составах ПМерБ, ПМБ (рис. 6) при 900 °С, а в составе ИИБ низкоосновная ферритная фаза CF ($d = 2,69; 2,52; 1,84 \text{ \AA}$).

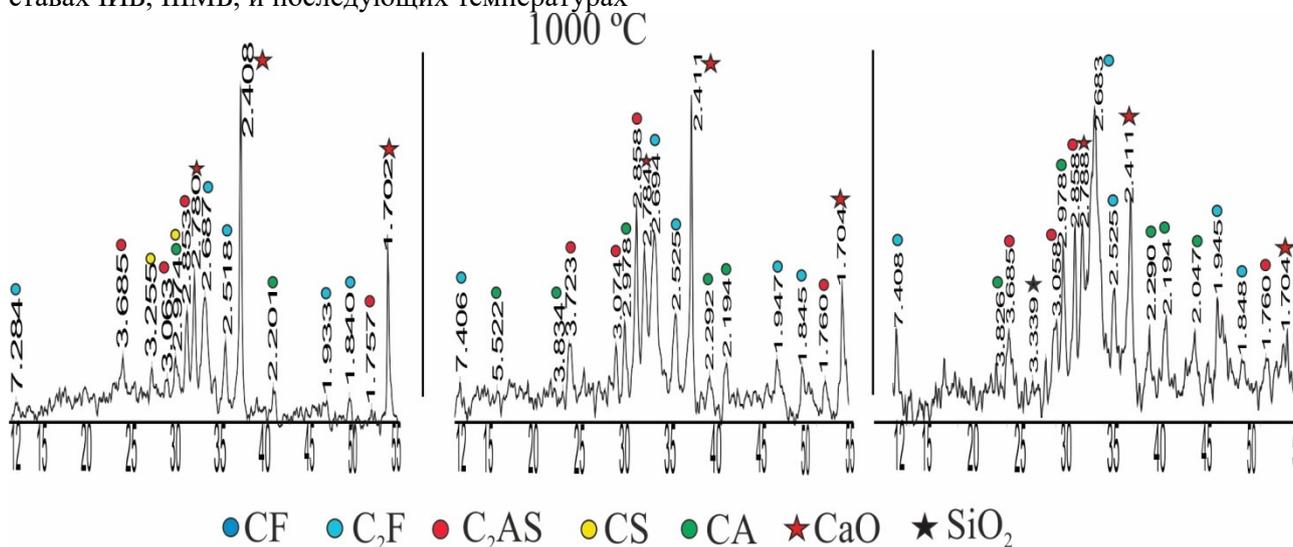


Рис. 9. Рентгенограммы фазового состава клинкеров в области 1000 °С

С повышением температуры до 1000 °С (рис. 9) первичный фазовый состав представлен: **ИИБ** CaO ($d = 2,78; 2,41; 1,70 \text{ \AA}$), C_2F ($d = 7,28; 2,69; 2,52; 1,93; 1,84 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,68; 3,06; 2,85; 1,76 \text{ \AA}$); CA ($d = 2,97; 2,20 \text{ \AA}$), CS ($d = 3,25; 2,97 \text{ \AA}$); **ПМерБ** CaO ($d = 2,78; 2,41; 1,70 \text{ \AA}$), C_2F ($d = 7,41; 2,69; 2,52; 1,94; 1,84 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,72; 3,07; 2,85; 1,76 \text{ \AA}$), CA ($d = 5,52; 3,83; 2,97; 2,30; 2,19 \text{ \AA}$); **ПМБ** CaO ($d = 2,79; 2,41; 1,70 \text{ \AA}$), C_2F ($d = 7,41; 2,68; 2,52; 1,94; 1,85 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,68; 3,06; 2,86; 1,76 \text{ \AA}$), CA ($d = 3,83; 2,98; 2,30; 2,19; 2,05 \text{ \AA}$).

Интенсивнее процесс синтеза CA, C_2AS , C_2F идет в составах с мергелем и мелом. Это связано с дефектностью и не плотной структурой минерала карбоната кальция и образованием при термической обработке более реакционноспособного оксида кальция.

Реакция образования клинкерных фаз CA, CF, C_2F протекают через твердофазовые взаимодействия, так как в при температурах 900–950 °С наличие жидкой фазы невозможно. А образование фазы алюмосиликата C_2AS , предположительно, происходит через 2 реакции взаимодействия: (1) реакция метасиликата (CS) с моноалюминатом кальция (CA); (2) реакция метаклаинита ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$) и/или силлиманита ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) с оксидом кальция. Так, дифракционные отражения соединения CS наблюдаются в составах с известняком при 900–950–1000 °С и с мергелем 900–950 °С. При этом прослеживается

характерные изменения интенсивности геленита (рис. 8).

Проследить наличие метаклаинита и силлиманита на рентгенограммах во всех составах составляет трудности, так как данная фаза ввиду низкого количества каолинита 22,8 % в бокситах и слабой кристалличности, сложно идентифицировать.

Но по результатам ДТА (рис. 10) видно, что при нагревании боксита происходят две эндотермических реакции: частичное удаление кристаллизационной воды из гидроаргиллита, с последующим образованием бемита (рис. 1, а) и полная дегидратация бемита и каолинита. А продуктами реакции разложения каолинита и являются метаклаинит ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$) и силлиманит ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$).

Таким образом, в процессе обжига КАФК в интервале температур 900–1000 °С, сырьевые смеси поэтапно претерпевают ряд физико-химических превращений, основными из которых являются термическая диссоциация $CaCO_3$, образование промежуточных фаз (CS, CF, $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$, $Al_2O_3 \cdot SiO_2$), в результате разложение сопутствующих минералов и твердофазных взаимодействий, а также начало образования клинкерных соединений CA, C_2AS и C_2F , которые и представляют основной фазовый состав кальцево-алюмоферритового клинкера в области температур 1100–1200 °С.

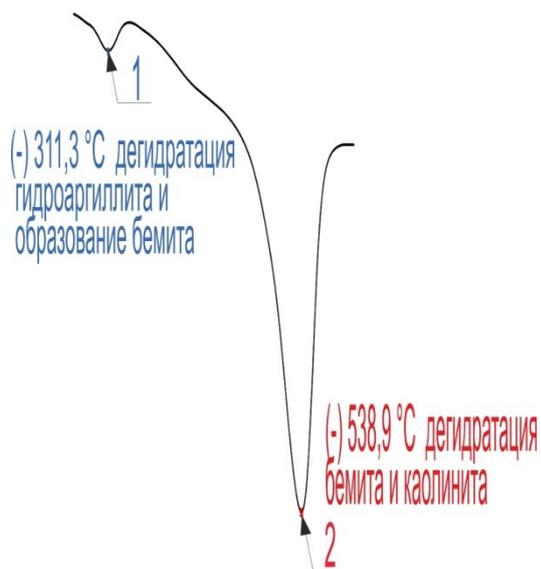


Рис. 10. Термограмма боксита

1100 – 1200 °С. Высокотемпературная зона обжига – это зона, где происходит формирование основного клинкерного состава. Например, для портландцементного клинкера высокотемпературной областью считается интервал температур 1200–1450 °С. Для кальциево-алюмоферритного клинкера ввиду низкой температуры плавкости системы данный промежуток температур составляет 1100–1200 °С. В данном исследовании последующий нагрев сырьевых смесей показал, что при температуре 1250 °С смеси частично начинают оплаиваться, что не соответствовало поставленным целям и задачам эксперимента. Низкая температура плавкости смеси оказывает неблагоприятное влияние на технологический процесс обжига, в особенности, если в качестве обжигового агрегата используется вращающаяся печь [18].

На рисунке 11 представлены рентгенограммы с фазовым составом, полученные в области температур 1100-1200°С.

Фазообразование при нагревании исследуемых сырьевых смесей при температуре

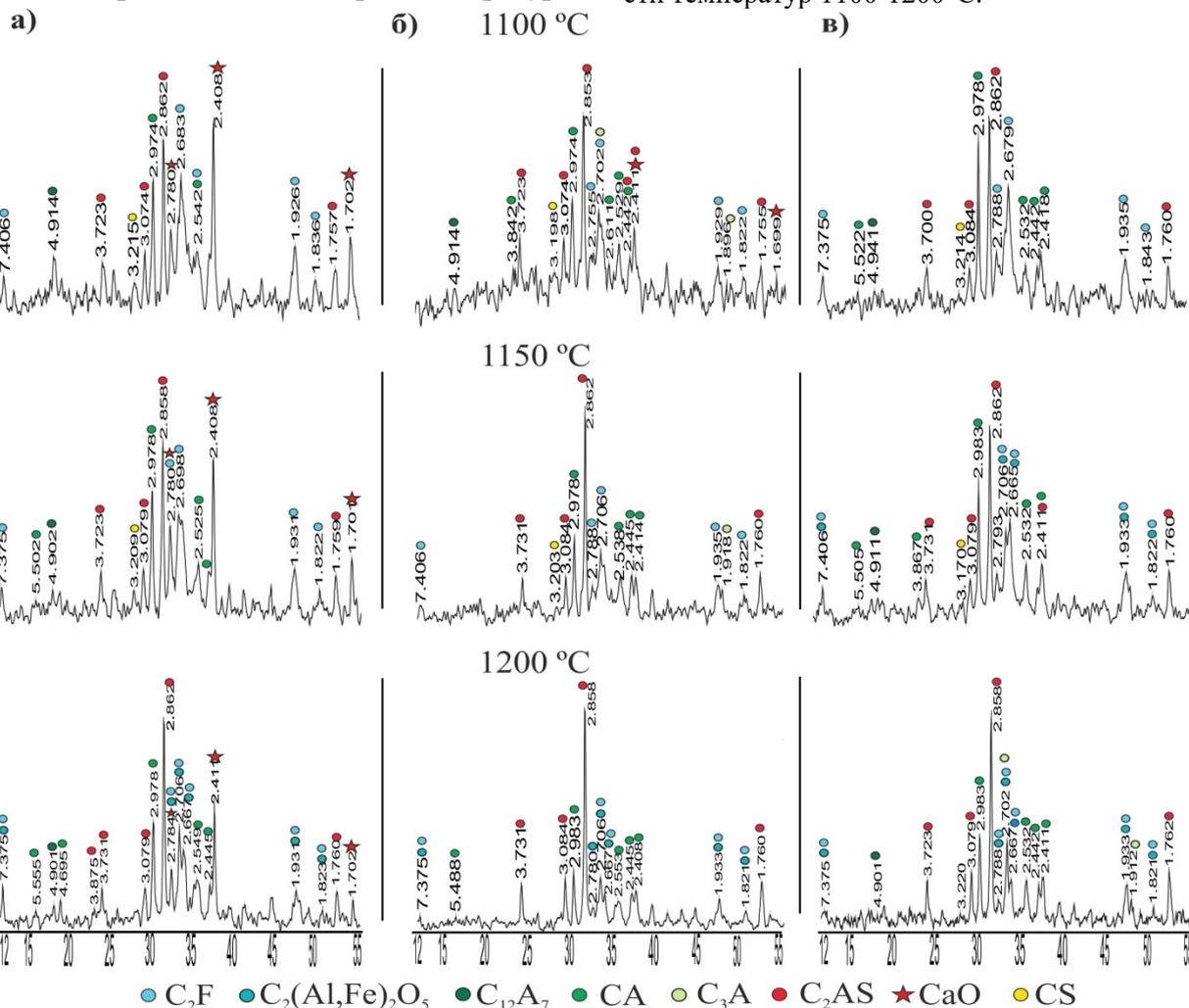


Рис. 11. Фазообразование в интервале температур 1100–1200°С:

а) ИИБ; б) ИМРБ; в) ИПМБ

Как видно, на рис.11 при температуре 1100 °С идет активное усвоение оксида кальция.

Наблюдается образование фазы C₁₂A₇ (d = 4,91 Å) во всех составах.

Увеличивается содержание моноалюмината кальция в составах ИИБ и ШМБ – 325 имп/сек и 533 имп/сек, соответственно, что на 25,5 % выше для состава ИИБ и на 108,2 % для состава ШМБ, относительно температуры 1000 °С. И на 37,1 % (ИИБ) и на 125 % (ШМБ) относительно состава ШМерБ при температуре 1100 °С.

Также активно формируется фаза C_2AS , наибольшее содержание при 1100 °С наблюдается в составах ИИБ и ШМБ, 576 имп/сек и 714 имп/сек, соответственно.

Результаты сравнительного анализа относительного содержания фаз СА и C_2AS представлены на рис. 12.

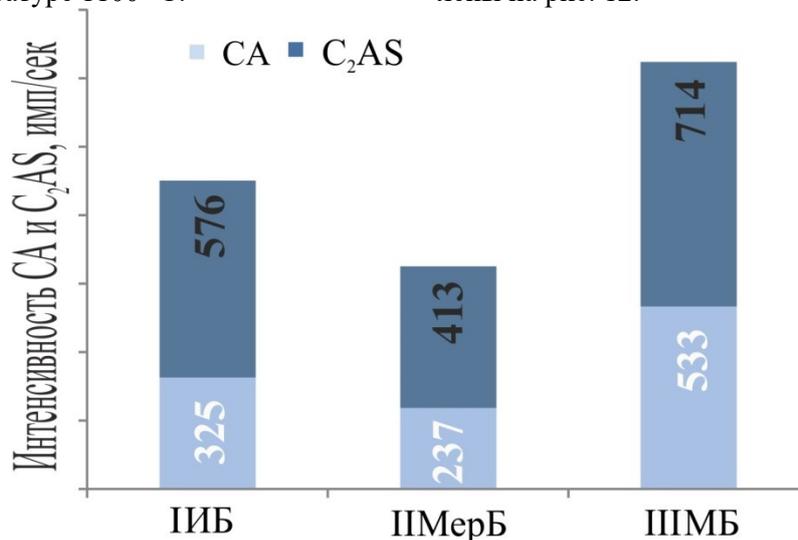


Рис. 12. Относительное содержание фаз СА и C_2AS при температуре 1100 °С

При температуре 1150 °С основными физико-химическими превращениями является усвоение оксида кальция и увеличение содержания каждой из фаз клинкера. На рис. 10 видно,

что весь имеющийся в системе СаО идет на образование инертного соединения C_2AS , при дальнейшем увеличении температуры до 1200 °С, это четко наблюдается в составах ШМерБ и ШМБ (рис. 13).

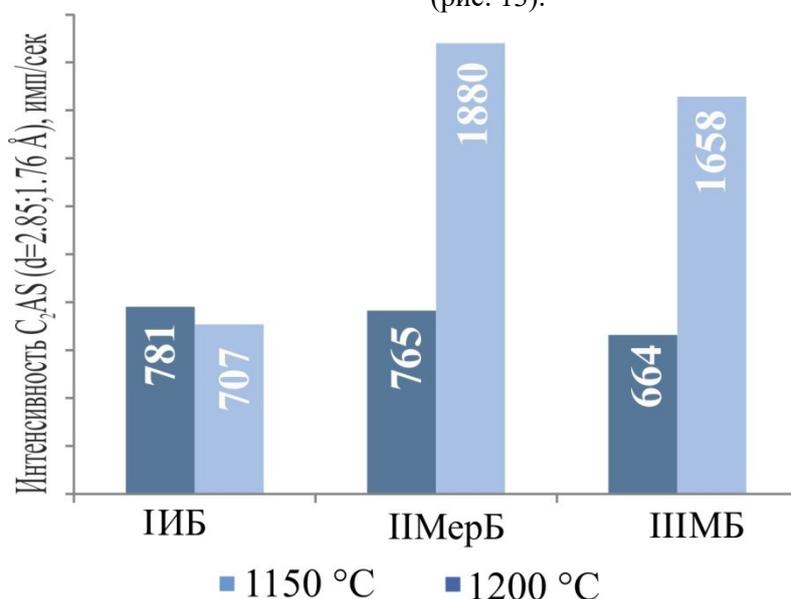


Рис. 13. Относительное содержание C_2AS при температурах 1150–1200°С

А в составе ИИБ наблюдается обратная ситуация снижения фазы геленита на 9,94 % при температуре 1200 °С. При температурах 1100-1150 °С отмечена фаза C_3A ($d = 2,70; 1,91 \text{ \AA}$) в составе ШМерБ и при температуре 1200°С в составе ШМБ. В области температур 1150-1200 °С в составе С, также наблюдается формирование фазы алюмоферрита кальция $C_2(Al,Fe)_2O_5$ ($d = 7,41;$

$2,71; 2,66; 1,93 \text{ \AA}$), а в составах ИИБ и ШМерБ только при температуре 1200 °С.

Существенные изменения фазового состава при температуре 1200 °С наблюдаются во всех составах ИИБ, ШМерБ и ШМБ. Происходит снижение интенсивности фазы СА, результаты сравнительного анализа приведены на рис. 14.

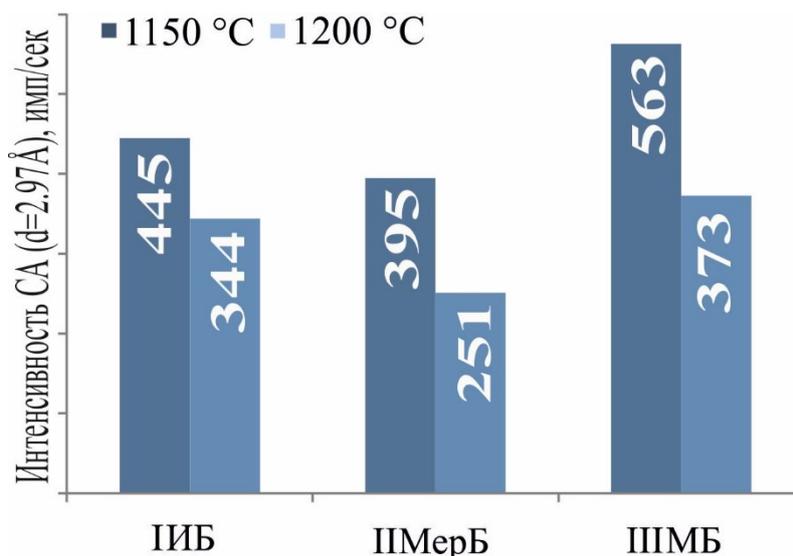
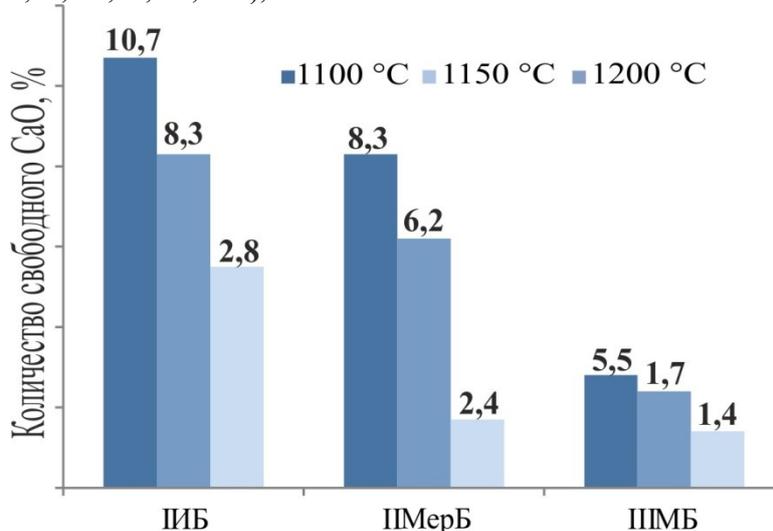


Рис. 14. Относительное содержание Са при температурах 1150 - 1200 °С

В составе ИИБ количество Са снижается на 22,7 %, в ПМерБ на 36,5 % и в ПМБ на 33,7 %. При температуре 1200 °С (рис. 10) сформированный фазовый состав представлен: **ИИБ** СаО ($d = 2,41; 1,70 \text{ \AA}$), $C_2(Al,Fe)_2O_5$ ($d = 7,37; 2,71; 2,67; 1,93; 1,82 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,73; 3,08; 2,86; 1,76 \text{ \AA}$), Са ($d = 5,54; 4,69; 2,97; 2,54; 2,44 \text{ \AA}$), $C_{12}A_7$ ($d = 4,91 \text{ \AA}$); **ПМерБ** $C_2(Al,Fe)_2O_5$ ($d = 7,38; 2,71; 2,67; 1,93; 1,82 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,73; 3,08; 2,86; 1,76 \text{ \AA}$), Са ($d = 5,49; 3,83; 2,98; 2,55; 2,44 \text{ \AA}$); **ПМБ**

$C_2(Al,Fe)_2O_5$ ($d = 7,38; 2,70; 2,67; 1,93; 1,82 \text{ \AA}$), C_2AS ($d = 3,72; 3,08; 2,86; 1,76 \text{ \AA}$), Са ($d = 2,98; 2,53; 2,44; 2,41 \text{ \AA}$), C_3A ($d = 2,70; 1,91 \text{ \AA}$).

В составе ИИБ в результате более медленного разложения СаСО₃ и формирования СаО все физико-химические превращения протекают значительно медленнее, чем в иных составах. Количество свободного СаО во всех составах при температурах 1100–1200 °С представлено на рис. 15.

Рис. 15. Содержание СаО_{св} при температурах 1100–1200 °С

Для состава ПМБ характерно почти полное усвоение СаО. Предположительно, приближение к температуре расплава 1250 °С приводит к увеличению скорости всех физико-химических реакции и формированию фазы C_2AS (рис. 13).

На основании полученных результатов можно сделать выводы, во-первых, единый для всех составов режим термообработки целесообразно применять. Следуют рассматривать последующий обжиг при разных температурах и изотермических выдержках. Так, рекомендуе-

мый температурный режим для состава ИИБ составляет 1150 °С с выдержкой 40–60 мин, для состава ПМерБ – 1100 °С с выдержкой 30–40 мин и ПМБ – 1100 °С с выдержкой 30–40 мин. Это связано с тем, что процесс разложения СаСО₃, скорость реакции формирования, структура и свойства СаО, при нагревании исследуемых компонентов известняка, мергель и мел имеют отличительные особенности и следуют обратить на это особое внимание. Это является важным фактором в технологическом процессе.

Во-вторых, процесс усвоения СаО оказывает неблагоприятное влияние на процесс формирования фазового состава кальцево-алюмоферритового клинкера, в сравнении с обжигом портландцементного клинкера, где весь образовавшийся СаО усваивается в основной клинкерной фазе C_3S . Для кальцево-алюмоферритного клинкера соединение C_2AS является инертной фазой, и того, какое количество будет образовано, зависит гидратационная активность цемента. Так как алюмосиликат кальция не обладает вяжущими свойствами.

Выводы.

1. Карбонатный компонент сырьевой смеси, отличающийся своей структурой, может оказывать влияние на физико-химические реакции при нагревании.

2. Известняк по структуре среднекристаллический, частицы хорошо закристаллизованы, дефектны и неоднородны.

3. Мергель мелкокристаллический, имеет смещенную структуру, состоящую из разрушенных коколитов и их частиц, а также кристаллического вида кальцита.

4. Мел на 97,6 % состоит из карбоната кальция ($CaCO_3$) в виде коколитов и пластин, из которых образуются кокколитофориды - крошечные одноклеточные водоросли, а также из большого количества разрушенных коколитов и их обломков разной формы.

5. В процессе обжига КАФК в интервале температур 900–1000 °С сырьевые смеси поэтапно претерпевают ряд физико-химических превращений, основными из которых являются термическая диссоциация $CaCO_3$, образование промежуточных фаз ($CS, CF, Al_2O_3 \cdot 4SiO_2, Al_2O_3 \cdot SiO_2$), в результате разложения сопутствующих минералов и твердофазных взаимодействий, а также начало образования клинкерных соединений CA, C_2AS и C_2F .

6. Повышение температуры до 1200 °С не приводит к образованию качественного фазового состава кальцево-алюмоферритового клинкера. Так как приближение к температуре расплава 1250 °С приводит к увеличению скорости всех физико-химических реакций, особенно заметно это влияет на формирование фазы C_2AS .

7. Единый режим термообработки нецелесообразно применять для всех составов, поэтому необходимо рассматривать различные температуры и изотермические выдержки. Для состава ИБ рекомендуется использовать температуру 1150 °С с выдержкой 40–60 минут, для состава ПМерБ – 1100 °С с выдержкой 30–40 минут, а для ПМБ – 1100 °С с выдержкой 30–40 минут.

8. При синтезе кальцево-алюмоферритового цемента, возможно использовать карбонатные породы, такие как известняк, мергель и мел. Однако необходимо учитывать структуру данных пород и физико-химические превращения, которые происходят при их нагревании. Только при соблюдении этих условий можно достичь желаемого результата и получить качественный цемент.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект № 12/22 «Разработка технологии и получение специальных безусадочных и слаборасширяющихся композиционных вяжущих»

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бадола А. Цементная промышленность Индии как составляющая замкнутого цикла производства и потребления // Цемент и его применение. 2022. № 6. С. 44–47.

2. Василик Г. Ю., Еремина Е.М. Цементная промышленность России в 2019 году // Цемент и его применение. 2019. № 6. С. 20–31.

3. Кривобородов Ю.Р., Тхет Наинг М. Теоретические предпосылки создания композиционных строительных материалов на основе специальных цементов // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 2. С. 179–188.

4. Затяева Д.А., Потапова Е.Н., Бурлов И.Ю. Исследование свойств сульфатостойких цементов в агрессивных средах Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 14(249). С. 16–18.

5. Гребенюк А.А., Смаль Д.В., Давидюк А.С., Пономарева П.С. Получение смешанных композиционных цементов на основе ферритного клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 89–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-89-101.

6. Самченко С.В. Коррозионностойкие цементы на основе сульфатированных клинкеров // Сухие строительные смеси. 2013. № 2. С. 26–27.

7. Эрдман С.В., Постникова А.Н. Водостойкие смешанные магнезиальные вяжущие // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-3. С. 773–778.

8. Лотов В.А., Митина Н.А. Магнезиальный цемент повышенной водостойкости // Вестник науки Сибири. 2011. № 1(1). С. 673–676.

9. Мин Х.Х., Потапова Е.Н. Получение сульфоалюминатного цемента и исследование его свойств // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2023. № 3(72). С. 2–9.

10. Чжо М.М., Мин Х.Х., Потапова Е.Н., Бурлов И.Ю. Получение сульфоалюминатного клинкера на основе промышленных отходов //

Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36. № 3(252). С. 144–146.

11. Харгис К.В., Лотенбах Б., Мюллер К.Й., Виннефельд Ф. Дополнительные сведения о расширении сульфоалюминатного цемента // Цемент и его применение. 2021. № 4. С. 42–54.

12. Мясников А.К., Сычева Л.И. Синтез сульфоалюминатного цемента и исследование его свойств // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 4(239). С. 70–72.

13. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 3(102). С. 326–333. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.326-333.

14. Борисов И.Н., Гребенюк А.А. Особенности гидратации и набора прочности сульфоферритных клинкеров и специальных цементов на их основе // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 88–91.

15. Борисов И.Н., Мандрикова О.С., Семин А.Н. Расширяющая добавка на основе сульфатированного и ферритного отходов для получения специальных цементов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 125–128.

16. Гребенюк А.А., Борисов И.Н. Изучение возможности получения расширяющей добавки на основе ферритного отхода с высоким содержанием β -кварца // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 7. С. 152–158.

17. Потапова Е.Н., Сулименко Л.М. Влияние природы цементного сырья на процессы структурообразования при обжиге клинкера // Цемент и его применение. 2010. № 1. С. 182–186.

18. Кузнецова Т.В. Глиноземистый цемент. М.: Стройиздат, 1988. 272 с.

Информация об авторах

Борисов Иван Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: in.borisov2016@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Новоселов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Никитина Мария Анатольевна, аспирант. E-mail: mn111993@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 16.02.2024 г.

© Борисов И.Н., Новоселов А.Г., Никитина М.А., 2024

Borisov I.N., Novoselov A.G., *Nikitina M.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

**E-mail: mn111993@mail.ru*

STUDY OF THE POSSIBILITY OF USING VARIOUS CARBONATE ROCKS IN THE SYNTHESIS OF CALCIUM-ALUMINOFERRITE CLINKER

Abstract. The article considers the possibility of using carbonate rocks of limestone, marl and chalk in the synthesis of calcium-aluminoferrite clinker (CAFC). The analysis of the structure of carbonate rocks, as well as their influence on the physico-chemical processes occurring during the synthesis of calcium-aluminoferrite clinker, is given. Phase formation has been studied in the temperature ranges 900–1000 °C and 1100–1200 °C with an isothermal exposure of 20 minutes. The heat treatment mode has been selected to obtain the basic phase composition of calcium-aluminoferrite clinker. The dynamics of changes in the qualitative phase composition of firing products at various temperatures, ranging from 900 °C to the clinker sintering temperature of 1200 °C, as well as quantitative characteristics of the intensity of formation of the main clinker phases are presented. It was found that during the firing of CAFC in the temperature range of 900–1000 °C, raw materials mixtures gradually undergo a number of physico-chemical transformations, the main of which are thermal dissociation of CaCO_3 , the formation of intermediate phases (CS , CF , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), as a result of decomposition of accompanying minerals and solid-phase interactions, as well as the beginning of the formation of clinker compounds CA , C_2AS and C_2F . It is proposed to use for the limestone-bauxite composition a temperature of 1150 °C with an exposure of 40–60 minutes, marl-bauxite – 1100 °C with an exposure of 30–40 minutes and chalk-bauxite – 1100 °C with an exposure of 30–40 minutes.

Keywords: limestone, marl, chalk, bauxite, calcium-aluminoferrite clinker, calcium monoaluminate, gel-enite, calcium oxide, calcium carbonate.

REFERENCES

1. Badola A. Cement industry of India as a component of a closed cycle of production and consumption [Cementnaya promyshlennost' Indii kak sostavlyayushchaya zamknutogo cikla proizvodstva i potrebleniya]. Cement and its application. 2022. No. 6. Pp. 44–47. (rus)
2. Vasilik G.Yu., Eremina E.M. Cement industry of Russia in 2019 [Cementnaya promyshlennost' Rossii v 2019 godu]. Cement and its application. 2019. No. 6. Pp. 20–31. (rus)
3. Krivoborodov Yu.R., Thet Naing M. Theoretical prerequisites for the creation of composite building materials based on special cements [Teoreticheskie predposylki sozdaniya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov na osnove special'nykh cementov]. Technique and technology of silicates. 2022. Vol. 29. No. 2. Pp. 179–188. (rus)
4. Zatyayeva D.A., Potapova E.N., Burlov I.Y. Investigation of the properties of sulfate-resistant cements in aggressive media Advances in chemistry and chemical technology [Issledovanie svoystv sul'fatostojkikh cementov v agressivnykh sredah]. Advances in chemistry and chemical technology. 2021. Vol. 35. No. 14(249). Pp. 16–18. (rus)
5. Grebenyuk A.A., Smal D.V., Davidiyuk A.S., Ponomareva P.S. Obtaining mixed composite cements based on ferritic clinker [Poluchenie smeshannykh kompozitsionnykh cementov na osnove ferritnogo klinkera]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 89–101. DOI:0.34031/2071-7318-2022-8-1-89-101. (rus)
6. Samchenko S.V. Corrosion-resistant cements based on sulfated clinkers [Korroziionnostojkie cementy na osnove sul'fatirovannykh klinkerov]. Dry building mixes. 2013. No. 2. Pp. 26–27. (rus)
7. Erdman S.V., Postnikova A.N. Waterproof mixed magnesian binders [Vodostojkie smeshannye magnezial'nye vyazhushchie]. Fundamental research. 2013. No. 8-3. Pp. 773–778. (rus)
8. Lotov V.A., Mitina N.A. Magnesia cement of increased water resistance [Magnezial'nyj cement povyshennoj vodostojkosti]. Bulletin of Siberian Science. 2011. No. 1(1). Pp. 673–676. (rus)
9. Min H.H., Potapova E.N. Obtaining sulfoaluminate cement and the study of its properties [Poluchenie sul'foalyuminatnogo cementa i issledovanie ego svoystv]. ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes. 2023. No. 3(72). Pp. 2–9. (rus)
10. Zhuo M.M., Min H.H., Potapova E.N., Burlov I.Y. Obtaining sulfoaluminate clinker based on industrial waste [Poluchenie sul'foalyuminatnogo klinkera na osnove promyshlennykh othodov]. Advances in chemistry and chemical technology. 2022. Vol. 36. No. 3(252). Pp. 144–146. (rus)
11. Hargis K.V., Lotenbach B., Muller K.J., Winnefeld F. Additional information about the expansion of sulfoaluminate cement [Dopolnitel'nye svedeniya o rasshirenii sul'foalyuminatnogo cementa]. Cement and its application. 2021. No. 4. Pp. 42–54. (rus)
12. Myasnikov A.K., Sycheva L.I. Synthesis of sulfoaluminate cement and research of its properties [Sintez sul'foalyuminatnogo cementa i issledovanie ego svoystv]. Advances in chemistry and chemical technology. 2021. Vol. 35. No. 4(239). Pp. 70–72. (rus)
13. Elenova A.A., Krivoborodov Yu.R. Synthesis of an expanding additive to eliminate shrinkage of cement stone [Sintez rasshiryayushchej dobavki dlya ustraneniya usadki cementnogo kamnya]. Bulletin of the MGSU. 2017. Vol. 12. No. 3(102). Pp. 326–333. DOI:10.22227/1997-0935.2017.3.326-333. (rus)
14. Borisov I.N., Grebenyuk A.A. Features of hydration and strength gain of sulfoferrite clinkers and special cements based on them [Osobennosti gidratatsii i nabora prochnosti sul'foferritnykh klinkerov i special'nykh cementov na ih osnove]. Cement and its application. 2019. No. 3. Pp. 88–91. (rus)
15. Borisov I.N., Mandrikova O.S., Semin A.N. An expanding additive based on sulfated and ferritic waste for the production of special cements [Rasshiryayushchayasya dobavka na osnove sul'fatirovannogo i ferritnogo othodov dlya polucheniya special'nykh cementov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. No. 1. Pp. 125–128. (rus)
16. Grebenyuk A.A., Borisov I.N. Study of the possibility of obtaining an expanding additive based on ferritic waste with a high content of β -quartz [Izuchenie vozmozhnosti polucheniya rasshiryayushchejsya dobavki na osnove ferritnogo othoda s vysokim soderzhaniem β -kvarca]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 152–158. (rus)
17. Potapova E.N., Sulimenko L.M. The influence of the nature of cement raw materials on the processes of structure formation during clinker firing [Vliyanie prirody cementnogo syr'ya na processy strukturoobrazovaniya pri obzhige klinkera]. Cement and its application. 2010. No. 1. Pp. 182–186. (rus)
18. Kuznetsova T.V. Alumina cement. [Glinozemistyj cement]. M.: Stroyizdat, 1988.272 p. (rus)

Information about the authors

Borisov, Ivan N. E-mail: in.borisov2016@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Novosyolov, Alexey G. E-mail: novosyolovag@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Nikitina, Mariya A. E-mail: mn111993@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 16.02.2024

Для цитирования:

Борисов И.Н., Новоселов А.Г., Никитина М.А. Изучение возможности использования различных карбонатных пород при синтезе кальциево-алюмоферритового клинкера // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 76–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-76-89

For citation:

Borisov I.N., Novoselov A.G., Nikitina M.A. Study of the possibility of using various carbonate rocks in the synthesis of calcium-aluminoferrite clinker. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 76–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-76-89

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106

Слободянский М.Г.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

E-mail: m.slobodianskii@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА, НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация. В статье предлагается методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования его напряженного состояния, которая сформулирована с использованием известных зависимостей для оценки среднего ресурса деталей механического оборудования по критерию кинетической прочности, метода линеаризации случайных аргументов позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала. Она позволяет на стадиях проектирования и эксплуатации учитывать всестороннее влияние на гамма-процентный ресурс условий нагружения исследуемого технического объекта, его рабочей температуры, физических и механических характеристик структурных составляющих серого чугуна. Её главными отличительными особенностями являются математические зависимости, позволяющие оценивать величину дисперсии параметров необходимых для расчета ресурсных характеристик, а также возможность учета анизотропии реальной структуры серых чугунов. Дополнительно проведена процедура верификации предлагаемой методики сравнением теоретически полученных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной в нормативно-технической документации. В качестве объекта исследований рассмотрена распорная плита щековой дробилки СМД-110, изготавливаемая из серого чугуна марки СЧ-20, физические и механические характеристики структурных составляющих которого, такие как модуль упругости и микротвердость по Виккерсу, экспериментально оценивались с использованием метода инструментального индентирования. Ошибка прогнозирования не превышает 18 %, что в свою очередь подтверждает достаточный уровень достоверности предлагаемых в настоящей статье теоретических решений, которые могут быть использованы при проектировании деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов, а также при формировании структуры периодичности его ремонтов.

Ключевые слова: гамма-процентный ресурс, долговечность, металлургическое оборудование, напряженное состояние, микроструктурное моделирование, серый чугун.

Введение. Серые чугуны получили широкое применение в металлургическом машиностроении при изготовлении разнообразной номенклатуры промышленных изделий, которая включает в себя: крышки, зубчатые колеса, поршни, корпусные детали редукторов, маховики, муфты сцепления, элементы машин, работающие на сжатие и т.д. Однако особенности их микроструктуры в большинстве случаев определяет и в тоже время сильно ограничивает возможные области использования.

Внеплановые отказы деталей металлургических машин, изготовленных из различных марок серых чугунов, по критериям прочности приводят к существенному повышению затрат на ремонтные мероприятия, направленные на поддержание оборудования в работоспособном состоянии и снижению производительности производства.

На стадиях проектирования и эксплуатации механического оборудования металлургического

производства для оценки работоспособности деталей и узлов, изготовленных из серых чугунов, используются те же общие принципы, как и для других конструкционных материалов, которые не учитывают особенности строения их микроструктуры. В частности, форму графитовых включений, которая определяет прочностные свойства серого чугуна и возможные области его применения [1], однако в инженерной практике при оценке работоспособности изготовленных из него деталей учитывают лишь только макросвойства, такие как предел прочности, твердость и другие. Поэтому актуальным является вопрос разработки комплексного подхода, позволяющего прогнозировать долговечность деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов с учетом особенностей реальной их микроструктуры.

При проектировании и эксплуатации деталей металлургического оборудования для рас-

чета их работоспособности используется статический критерий прочности [2 - 4]. Данный подход предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений, возникающих в исследуемом техническом объекте с величиной предельно допускаемых, которые определяются в функции предела прочности или предела текучести материала. Если расчетные напряжения не превышают предельно допускаемые, то подразумевается, что условие работоспособности выполняется, и исследуемая деталь может работать сколь угодно долго. Вывод о работоспособности формируется на основе значений запаса прочности, определяемого отношением предельно допускаемых напряжений к расчетным, минимально допустимая величина которого назначается при проектировании технического объекта согласно рекомендациям работ [2–4]. При использовании статического критерия прочности ресурс детали не прогнозируется.

В случае, если деталь эксплуатируется в условиях стационарного циклического нагружения, то её средний ресурс вычисляется из соотношения количества циклов приложения нагрузки до достижения предельного состояния к частоте нагружения [3–6]. Однако, для использования указанного подхода необходимы данные о параметрах кривой усталости Веллера, что в свою очередь требует проведения длительных и дорогостоящих лабораторных испытаний.

Указанные подходы [2–6] предполагают оценку долговечности деталей с использованием показателей, представляющих собой детерминированные величины, что в свою очередь может быть недостаточно информативным в случае разработки регламента ТОиР металлургического оборудования.

В работах [7, 8] приведена методика расчета вероятности безотказной работы деталей машин по критериям прочности, которая определяется как вероятность выполнения следующего условия:

$$S > 0, \quad (1)$$

где $S = R - \sigma$ – случайная величина; R – предел прочности или текучести материала исследуемой детали; σ – максимальные напряжения в детали, которые в свою очередь тоже принимаются случайной величиной.

Основным допущением подхода, предлагаемого в работах [7, 8], является то, что распределение случайных величин принимается по нормальному закону, и в этом случае вероятность безотказной работы детали рассчитывается с использованием нормированных таблиц по значению квантили.

Используя схожее допущение о распределении ресурса деталей и узлов металлургических

машин по нормальному закону, авторы работ [9, 10] предлагают применение метода линеаризации функции случайных аргументов, согласно [11], для оценки показателей долговечности типовых элементов металлургического оборудования, таких как шестерни и колеса зубчатых передач, подшипников качения, а также валов и осей. Он позволяет выполнять проектную оценку основных показателей долговечности исследуемых объектов, таких как вероятность безотказной работы и гамма-процентный ресурс для следующих условий:

- исследуемые детали металлургического оборудования работают в условиях циклического нагружения;
- случайными величинами принимаются: геометрические размеры детали в диапазонах установленных допусков (согласно конструкторской документации), условия нагружения (кинематические и силовые характеристики), механические характеристики материалов.

Поскольку предлагаемый авторами работ [9, 10] подход базируется на определении среднего ресурса деталей, функционирующих в условиях стационарного циклического нагружения, то для определения его дисперсии с использованием метода линеаризации случайных аргументов [11] необходимо учитывать рассеяние возможных значений исходных данных. Таким образом, фактор случайности при определении величин действующих напряжений и количества циклов приложения нагрузки до достижения предельного состояния учитывается за счет рассеяния значений геометрических размеров детали в диапазонах установленных допусков, которые указываются в конструкторской документации. Стохастический характер механических характеристик материалов определяется возможным диапазоном значений в справочной литературе.

Гамма-процентный ресурс определяется из уравнения квантили нормального распределения для изначально заданного значения вероятности безотказной работы исследуемой детали металлургического оборудования [9, 10].

Данный подход [9, 10], как и описанные выше, также предусматривает необходимость использования кривой усталости материала.

Известен аналитический подход [12–15] к оценке среднего ресурса деталей и узлов металлургического оборудования, в основе которого использованы принципы параметрической надежности машин А.С. Проникова [16] и базовые положения кинетической концепции повреждения и разрушения материалов В.В. Федорова [17, 18]. Он позволяет на стадиях проектирования и эксплуатации рассчитывать средний ресурс исследуемого технического объекта по

различным критериям прочности в функции рабочей температуры, условий внешнего нагружения, механических и теплофизических характеристик материала.

Авторами работы [19] предложен семиэтапный методологический подход построения физико-вероятностных моделей отказов объемно нагруженных деталей машин, в рамках которого параметром, описывающим их состояние, принимается плотность потенциальной составляющей

$$t_{\gamma} = \frac{i_{\gamma} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{i_{\gamma}}}{i_{\gamma}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{u}_{*}}{i_{\gamma}} \right)^2}}{\left[u_{np(\gamma)} \right]^2 \cdot \sigma_{i_{\gamma}}^2}, \quad (2)$$

где i_{γ} и $\sigma_{i_{\gamma}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение скорости повреждения структуры материала [19]; $\Delta \bar{u}_{*} = u_{e*} - \bar{u}_{e0}$ – математическое ожидание предельной величины параметра состояния u_{et} исследуемой детали [19]; $\left[u_{np(\gamma)} \right]$ – значение квантили определяемое величиной допустимой вероятности безотказной работы.

В качестве параметров, представляющих собой случайную величину, то есть имеющих исходное рассеяние, принимаются начальное значение плотности внутренней энергии u_{e0} и скорость повреждения структуры материала i_{γ} [19]. Авторами работы [19] вводится допущение о распределении их по нормальному закону, согласно [11, 16]. Однако следует учитывать, что в рамках рассматриваемого методологического подхода, [19] определяющего общую концепцию построения физико-вероятностных моделей отказов по кинетическому критерию прочности, для использования зависимости (2) необходимо определение числовых значений дисперсии и среднеквадратического отклонения принятых случайных параметров, что является весьма затруднительным.

Несмотря на достаточно высокий теоретический уровень описания физического процесса повреждения и разрушения материалов по различным критериям прочности и наличия зависимостей, позволяющих оценивать средний ресурс деталей машин [12–15, 19] в функции рабочей температуры, условий внешнего нагружения, механических и теплофизических свойств материала, не предусматривается возможность учёта анизотропии его микроструктуры. При оценке показателей долговечности используется величина макронапряжений, которая может быть определена с использованием как зависимостей теории сопротивления материалов, так и метода

внутренней энергии u_{et} , в соответствии с [12–15, 17, 18]. Рассматриваемый методологический подход предполагает оценку гамма-процентного ресурса исходя из допущения того, что выбранный параметр состояния u_{et} исследуемого технического объекта изменяется по нормальному закону распределения, таким образом, зависимость для его оценки принимает вид [19]:

конечно-элементного расчета напряженно-деформированного состояния в рамках общих принципов механики сплошной среды. В этом случае не учитывается неоднородность реальной микроструктуры материала, а именно процентное соотношение структурных составляющих, их геометрические параметры и механические характеристики, соответственно не представляется возможным оценить их влияние на величину показателей долговечности исследуемой детали.

Анализ известных работ показал, что в основе широко применяемых подходов к оценке долговечности деталей по критериям прочности лежат математические зависимости, требующие экспериментального определения эмпирических коэффициентов, в частности для кривой усталости материала [2–6, 9, 10]. Более того, они не в полной мере соответствуют реальной физической картине процесса разрушения материала и не учитывают особенности реальной микроструктуры, в частности серых чугунов, при оценке показателей долговечности.

Вопрос учета влияния особенностей реальной микроструктуры материала на долговечность нагруженных деталей металлургического оборудования может быть решен с использованием метода микроструктурного моделирования его напряженного состояния [20–24].

Целью исследований в данной работе является разработка методики вероятностной оценки показателей долговечности деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования его напряженного состояния.

Материалы и методы. Разработка методики предполагает совместное использование основополагающих принципов:

- параметрической теории надежности А.С. Проникова [16];
- кинетической концепции разрушения материалов В.В. Федорова [17, 18];

- аналитического подхода к оценке среднего ресурса деталей и узлов металлургического оборудования [12 - 15];

- метода линеаризации случайных аргументов [11];

- микромасштабного моделирования напряженного состояния реальной микроструктуры материала.

Верификация разрабатываемой методики предполагается на примере моделирования эксплуатации распорной плиты щековой дробилки СМД-110, изготовленной из СЧ-20.

Экспериментальные исследования подразумевают выполнение:

- исследований микроструктуры образцов из серого чугуна марки СЧ-20 для последующего формирования элементарного репрезентативного объема;

- определение микротвердости и модуля упругости отдельных структурных компонентов исследуемой марки чугуна, значения которых необходимы для оценки напряженного состояния репрезентативного объема и показателей долговечности исследуемого технического объекта с использованием предлагаемой методики.

Моделирование напряженного состояния исследуемого материала на макро- и микроуровнях выполнялось в программном комплексе SIMULIA ABAQUS с использованием решателя Static General.

Основная часть. Методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния. В основе построения предлагаемой методики использована физическая модель разрушения твердых тел, изложенная в работах [12–15, 17–19], которая предполагает, что повреждаемость материала в ходе нагружения вызвана процессом накопления в деформируемых объемах элементарных дефектов. В этом случае полагается, что разрушение твердого тела происходит тогда, когда в его объемах плотность дефектов и повреждений достигает предельной величины [19].

Совместное использование основных положений физической модели разрушения твердых тел [12–15, 17–19], построенной в соответствии с кинетической концепцией их повреждаемости, метода линеаризации случайных аргументов [11], позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния, позволяет сформулировать методику, предполагающую оценку гамма-процентного ресурса деталей, изготовленных из различных металлических материалов, в частности из серых чугунов.

Базовыми зависимостями для оценки математического ожидания ресурса исследуемого технического объекта в настоящей работе приняты уравнения, опубликованные в работах [12, 15, 19], которые предполагают при наличии определенного комплекса исходных данных выполнение расчёта величины среднего ресурса.

Однако для оценки гамма-процентного ресурса в данном случае необходимы математические зависимости, позволяющие определить не только средний ресурс (математическое ожидание), но и величину его дисперсии.

Для определения величины дисперсии параметров, входящих в методику оценки среднего ресурса технических объектов по критериям прочности [12–15, 17–19], предлагается использование метода линеаризации случайных аргументов [11], который был успешно апробирован в работах [9, 10].

Согласно работам [12–15, 17–19], значение ресурса исследуемой детали, работающей в условиях, приводящих к её отказу по критериям прочности, зависит от следующих параметров, которые в свою очередь могут быть недетерминированными величинами: физические (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность), механические (предел текучести, твердость по Виккерсу) и теплофизические (удельная теплоемкость, коэффициент линейного теплового расширения, энтальпия плавления в твердом состоянии) характеристики материала. В этом случае ресурс представляет собой функцию случайных аргументов, соответственно является случайной величиной, которая характеризуется дисперсией и математическим ожиданием.

При выводе зависимостей для оценки величин дисперсии и среднеквадратического отклонения на основе применения метода линеаризации случайных аргументов использован подход, представленный в работе [11].

Более того, согласно подходу, изложенному в работах [12–15, 19], средний ресурс нагруженной детали определяется в функции напряжений и характеристик материала на макроуровне, таких как предел текучести, твердость по Виккерсу, модуль упругости и не предполагает учёт фактической неоднородности его микроструктуры.

Главным теоретическим положением предлагаемой методики является расчет ресурсных характеристик материала в заданных условиях нагружения на основе моделирования напряженного состояния его отдельных структурных составляющих, разрушение которых в свою очередь определяет искомые показатели долговечности. Таким образом, ресурс детали из серого

чугуна может быть определен исходя из результатов оценки напряженного состояния его структурных компонентов (перлита, феррита, графита) и значений их физических, а также механических характеристик.

С учетом вышеизложенного, ниже представлены основные зависимости для расчета математического ожидания и дисперсии ресурса, а также определяющих его параметров.

Согласно [12–15, 19], средний ресурс (математическое ожидание ресурса) исследуемой детали по критерию прочности определяется с использованием следующей зависимости:

$$t = (u_{e^*} - u_{e0}) / \bar{i} \quad (3)$$

где $u_{e^*} = \Delta H_{TB} - c \cdot \rho \cdot T$ – предельное значение плотности внутренней энергии дефектов материала соответственно [12–15, 19];

$$u_{e0} = \left((0,067 \cdot H_{\mu})^{1,2} \cdot k_{\sigma} \right)^2 / (6 \cdot G) - \text{предельное и исходное значение плотности внутренней энергии дефектов материала соответственно [12–15, 19];}$$

\bar{i} – средняя скорость повреждаемости структуры материала [12–15, 19];

$$U(\sigma_0, T_f) - \text{средняя скорость повреждаемости структуры материала [12–15, 19];}$$

H_{μ} – микротвердость по Виккерсу структурной составляющей исследуемого материала;

ΔH_{TB} – энтальпия плавления материала исследуемой детали в твердом состоянии [12–15, 17–19];

$$k_{\sigma} = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot H_{\mu} + 1,2 \cdot 10^{-3})^{-1} - \text{комплексный структурный параметр материала детали, определяемый в функции микротвердости его соответствующей структурной составляющей [12–15, 17–19];}$$

G – модуль сдвига материала;

ΔH_{TB} – энтальпия плавления материала исследуемой детали в твердом состоянии [12–15, 17–19];

c и ρ – удельная теплоемкость и плотность материала;

T – рабочая температура исследуемой нагруженной детали.

j – результирующая удельная скорость накопления дефектов материала без учета сопротивления среды по Ле-Шателье [12–15, 19];

k_{cmp} – средний за время деформирования исследуемого объекта коэффициент Ле-Шателье, учитывающий сопротивление структуры материала её повреждаемости [12–15, 19];

$U(\sigma_0, T_f)$ – высота симметричного энергетического барьера [12–15, 19], которая может быть определена в функции предела текучести и микронапряжений, возникающих в структурной составляющей исследуемой детали.

Уравнение для расчета дисперсии ресурса будет иметь вид:

$$D_t = \left(\bar{i}^{-2} \cdot D_{u_{e^*}} + D_{u_{e0}} \right) / \left(\bar{i}^2 \cdot D_{U(\sigma_0, T_f)} + D_{U(\sigma_0, T_f)} \right) \quad (4)$$

где $D_{u_{e^*}}$, $D_{u_{e0}}$, $D_{\bar{i}}$ – дисперсии параметров, входящих в уравнение (1).

Зависимости для расчета дисперсии параметров u_{e^*} , u_{e0} , \bar{i} , k_{σ} , определяющих величину ресурса детали по уравнению (3), принимают следующий вид:

$$D_{u_{e^*}} = D_{\Delta H_{TB}} + T^2 \cdot (D_c + D_{\rho}) + (-c \cdot \rho)^2 \cdot D_T \quad (5)$$

$$D_{u_{e0}} = \left((0,067 \cdot H_{\mu})^{4,8} \cdot k_{\sigma}^4 / (36 \cdot G^2) \right) \cdot (5,747 \cdot HV_{\mu}^{-2} \cdot D_{H_{\mu}} + 4 \cdot k_{\sigma}^{-2} \cdot D_{k_{\sigma}} + D_G / G^2) \quad (6)$$

$$D_{\bar{i}} = \left(k_{cmp} \cdot U(\sigma_0, T_f) \right)^2 \cdot D_j + \left(j \cdot U(\sigma_0, T_f) \right)^2 \cdot D_{k_{cmp}} + \left(j \cdot k_{cmp} \right)^2 \cdot D_{U(\sigma_0, T_f)} \quad (7)$$

$$D_{k_{\sigma}} = \left((-6,47 \cdot 10^{-6}) / (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_{\mu} + 1,2 \cdot 10^{-3}) \right)^2 \cdot D_{H_{\mu}} \quad (8)$$

где $D_{\Delta H_{TB}}$, D_c , D_{ρ} , D_T , $D_{HV_{\mu}}$, D_G , D_j , $D_{U(\sigma_0, T_f)}$ – дисперсии параметров, определяющих значение ресурса и указанных в описании уравнения (3).

В данной статье приводятся только базовые уравнения, и излагается принцип определения

дисперсий исследуемой функции и определяющих её аргументов на основе применения метода линеаризации [11].

Зависимости, полученные с использованием метода линеаризации случайных аргументов, согласно [11], для расчета дисперсии предполагают возможность оценки влияния рассеяния каждого

из аргументов на дисперсию исследуемой функции, в нашем случае ресурса. Однако следует учитывать, что чем больше исходных параметров являются случайными, тем больше рассеяние имеет исследуемая функция. Поэтому зависимости для определения дисперсий могут быть упрощены, поскольку значения дисперсий параметров, не имеющих рассеяние будут равны нулю.

Гамма-процентный ресурс может быть определен исходя из допущения, что ресурс будет подчиняться нормальному закону распределения, поскольку его величина зависит от большого числа параметров, которые в свою очередь имеют стохастический характер [11]. В этом случае зависимость для его оценки примет вид:

$$t_\gamma = t - z \cdot \sqrt{D_t}, \quad (9)$$

где z – квантиль нормального распределения.

Параметры u_{e0} и k_σ , согласно [12–15, 17–19], определяются в функции макрохарактеристик. Однако, поскольку основным теоретическим положением предлагаемой методики является определение показателей долговечности детали на основе анализа напряженного состояния микроструктуры материала, то для расчета приведенных выше параметров необходимо использование характеристик определяющих свойства его структурных составляющих, таких как микротвердость HV_μ , модуль упругости E_{IT} и др.

Микротвердость HV_μ , а также модуль упругости E_{IT} структурных составляющих материалов (феррита, перлита, графита и т.д.), в частности для серых чугунов, не являются справочными данными, поэтому для их определения необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Для оценки среднего ресурса, согласно методикам работ [12–15, 19], необходимо определение величины напряжений, возникающих в исследуемой детали на макроуровне, что в свою очередь предполагает представление материала как изотропной среды. Данный подход не учитывает неоднородность реальной микроструктуры материала и влияние её особенностей (диаметр зерен по Ферету, процент их содержания, неоднородность распределения свойств по объему) на показатели долговечности исследуемого технического объекта.

В настоящей работе предлагается применение метода микроструктурного моделирования напряженного состояния материала, который позволяет учитывать его анизотропию. Он заключается в расчете напряженного состояния репрезентативного объема (Representative Volume Element (RVE)), трехмерная модель которого

формируется на основе результатов микроструктурного анализа материала, в ходе которого определяются структурные составляющие, их процентное соотношение, а также геометрические параметры.

В соответствии с работами [20–24], можно сформулировать общую последовательность этапов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала:

1. Проведение микроструктурного анализа материала, результатом которого является цифровой фотоснимок с отображением структурных составляющих, а также определение их процентного соотношения.

2. Выполнение графической обработки снимка микроструктуры с целью выделения отдельных структурных фаз и последующей его векторизации.

3. Формирование трехмерной модели репрезентативного объема на основе полученного векторного изображения микроструктуры материала с учетом полного соответствия геометрических размеров каждого структурного компонента RVE, тем, что установлены для реальных образцов.

4. Назначение физических и механических характеристик каждой структурной составляющей, в данном случае для перлита, феррита и графита, таких как модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона, предел текучести.

5. Проведение процедуры моделирования напряженного состояния исследуемого репрезентативного объема с использованием функциональных возможностей субмоделирования (Submodeling) реализованного в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. В этом случае, результаты напряженного состояния для глобальной модели (макромодели) исследуемого технического объекта послужат в качестве условий нагружения для элементарного репрезентативного объема.

По результатам моделирования напряженного состояния репрезентативного объема материала исследуемой детали определяются максимальные напряжения, возникающие в соответствующей структурной составляющей, а также места их локализации. На основе полученных данных о напряженном состоянии, с использованием зависимостей (3) – (8), а также экспериментально определённых значений микротвёрдости и модуля упругости структурных составляющих материала, возможно прогнозирование показателей долговечности, таких как вероятность безотказной работы и гамма-процентный ресурс, деталей металлургического оборудования изготовленных из различных марок серых чугунов.

Результаты экспериментальных исследований образцов из серого чугуна марки СЧ-20. Для формирования 3d модели элементарного репрезентативного объема (RVE) серого чугуна марки СЧ-20 были проведены исследования микроструктуры в НИИ «Наносталей» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» с использованием инвертированного микроскопа Zeiss Axio Observer 3, результаты которого отображены на рисунке 1а.

Исследуемый образец представляет собой феррито-перлитную структуру с включениями

пластинчатого графита. На следующем этапе, применяя программный комплекс Thixomet, выполнена бинаризация с выделением соответствующих структурных фаз, однако для более детального отображения всех компонентов структуры СЧ-20 проведена дополнительная обработка в специализированных графических редакторах, в результате чего получен снимок (см. рис. 1б) микроструктуры пригодный для последующей векторизации. Красным цветом выделена перлитная основа (матрица), зеленым – ферритные включения, черным – пластинчатый графит.

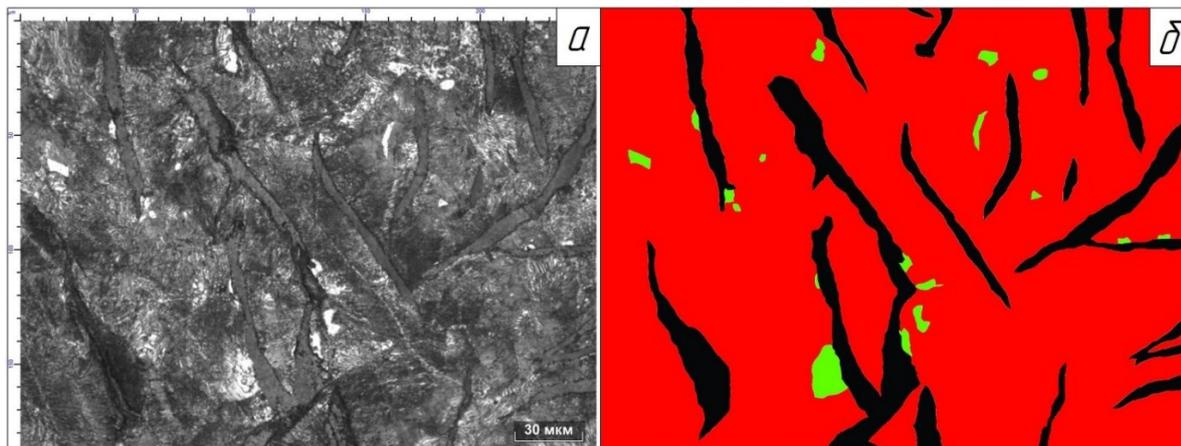


Рис. 1. Результаты исследований микроструктуры образца из серого чугуна СЧ-20 (увеличение 500х):
а) снимок микроструктуры образца из серого чугуна СЧ-20,
б) результаты обработки снимка микроструктуры для последующего формирования RVE

Дополнительно определен химический состав исследуемых образцов на оптическом эмиссионном спектрометре Spectromaxx, который показал следующее содержание основных элементов: С – 3,45 %; Si – 2,05 %; Mn – 0,8 %; P – 0,145 %; S – 0,075%. Полученные результаты соответствуют требованиям, установленным ГОСТ 1412-85.

Для выполнения всесторонних исследований показателей долговечности рассматриваемого технического объекта, с позиции прогнозирования момента разрушения отдельных структурных составляющих его материала, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований по оценке величины микротвердости. В этом случае наиболее предпочтительным является применение метода инструментального индентирования, который позволяет оценить микротвердость отдельных структурных составляющих исследуемого материала.

Оценку значений микротвердости по Виккерсу производили с использованием динамического микротвердомера Shimadzu DUN-211S в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 и ISO 14577-1 Annex A.

Согласно ГОСТ Р 8.748-2011, измерение микротвердости производится при непрерывном

внедрении в материал индентора, который представляет собой алмазный наконечник (индентор Берковича) с углом при вершине 115 градусов, под действием плавно нарастающей нагрузки с последующим её снятием. В процессе проведения испытаний происходит непрерывное отслеживание и регистрация зависимости перемещения индентора от прикладываемой нагрузки.

При проведении испытаний были приняты следующие значения параметров нагружения:

а) максимальная нагрузка индентирования 200 мН при исследовании общего значения микротвердости материала и 25 мН при определении значений для каждой его структурной составляющей;

б) минимальная нагрузка 1,96 мН;

в) скорость нагружения 70,067 мН/с;

г) длительность выдержки при максимальной нагрузке 2 с;

д) длительность выдержки при минимальной нагрузке 2 с.

Фотографии отпечатков индентора, полученных в ходе проведения испытаний по измерению динамической твердости и модуля упругости структурных составляющих чугуна марки СЧ-20, представлены на рисунке 2.

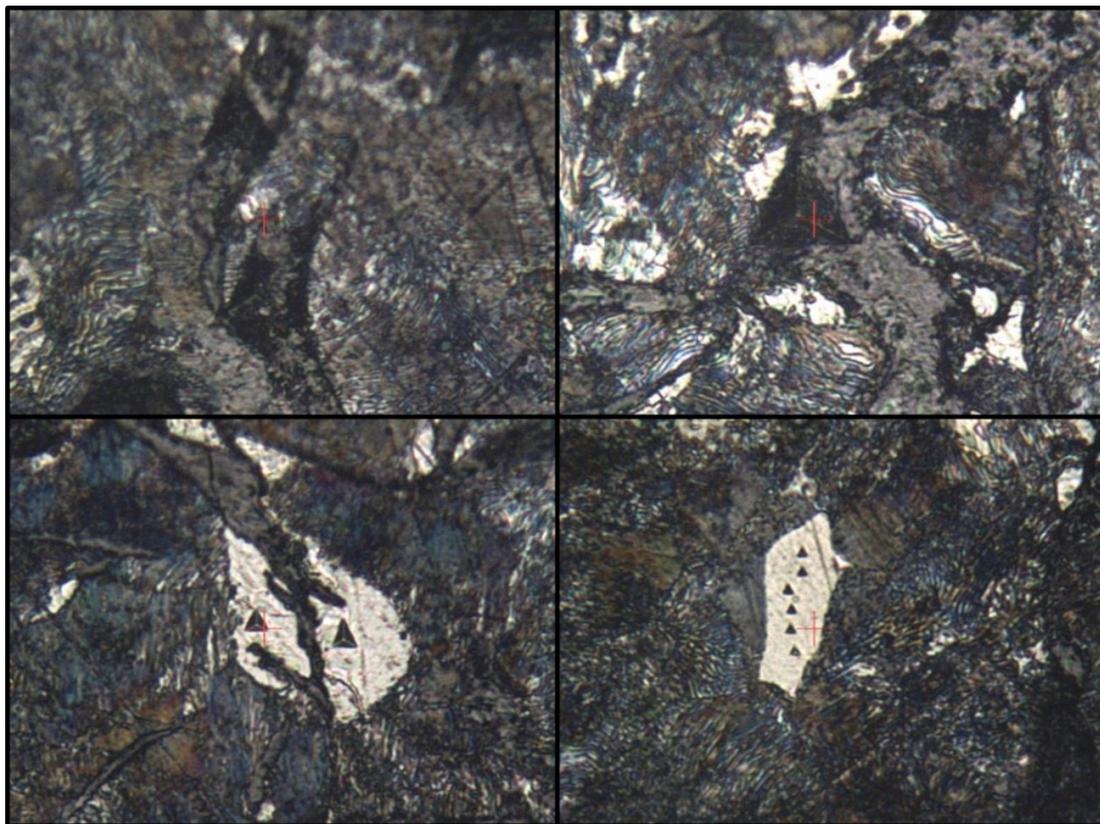


Рис. 2. Фотографии отпечатков индентора при измерении динамической твердости структурных составляющих чугуна СЧ-20

В ходе проведения испытаний определялись:

- твердость по шкале Мартенса HM_s , определяемая по наклону кривой нагружения на F-h-диаграмме;
- твердость индентирования H_{IT} ;
- микротвердость по Виккерсу HV_{μ} ;

- модуль упругости E_{IT} .

Результаты экспериментальной оценки значений микротвердости и модуля упругости структурных составляющих образцов из серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании в соответствии с ГОСТ Р 8.748-2011 отображены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальной оценки микротвердости и модуля упругости структурных составляющих серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011

Структурная составляющая материала		Твердость индентирования H_{IT} , МПа	Твердость по шкале Мартенса HM_s , МПа	Микротвердость HV_{μ} , МПа	Модуль упругости E_{IT} , МПа
Перлит*	Сред. знач.	12425,038	3698,712	3137,95	$4,063 \cdot 10^5$
	Станд. откл.	2290,349	554,07	550,885	$6,76 \cdot 10^4$
	Коэф. вар.	0,184	0,150	0,176	0,166
Феррит*	Сред. знач.	9035,778	2798,93	2299,63	$4,129 \cdot 10^5$
	Станд. откл.	1650,643	487,998	342,246	$6,805 \cdot 10^4$
	Коэф. вар.	0,183	0,1743	0,149	0,165
Графит*	Сред. знач.	658,139	747,517	198,985	$6,586 \cdot 10^4$
	Станд. откл.	113,658	130,368	33,5751	$1,241 \cdot 10^4$
	Коэф. вар.	0,173	0,174	0,169	0,188
Общее значение для материала**	Сред. знач.	3080,351	2182,085	2808,227	$1,115 \cdot 10^5$
	Станд. откл.	568,65	422,96	502,684	$1,7047 \cdot 10^4$
	Коэф. вар.	0,185	0,193	0,179	0,15

Примечание:
 *значения получены при усилии 25 мН;
 **значения получены при усилии 200 мН.

Результаты лабораторных исследований использованы при верификации разработанной методики на примере оценки гамма-процентного ресурса распорной щековой дробилки СМД-110 со сложным движением щеки.

Верификация теоретических решений на примере распорной плиты щековой дробилки. Верификация предлагаемых в настоящей работе решений подразумевает сравнение расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной нормативно-технической документацией исследуемого объекта. В качестве объекта исследований выбрана распорная плита щековой дробилки СМД-110 со сложным движением щеки, которая широко используется в различных отраслях промышленности и применяется для крупного и среднего дробления горных пород с пределом прочности не более 300 МПа. Распорная плита является неотъемлемой частью конструкции дробилки и выполняет предохранительную функцию, в случае попадания в рабочую камеру не дробимого материала, который может привести к поломке более дорогостоящих комплектующих, таких как дробящих плит или подвижной щеки.

Поскольку распорная плита функционирует в условиях циклического нагружения на сжатие, поэтому в качестве материала для её изготовления применяются серые чугуны, преимущественно марок СЧ-20 и СЧ-25.

В случае, если дробилка функционирует в стационарном режиме, то при условии отсутствия не дробимых объектов в рабочей камере ресурс распорной плиты должен соответствовать требованиям, установленным системой ТОиР данного агрегата, поскольку внеплановые отказы, вызванные её поломкой, могут привести к существенным финансовым затратам, связанным с вынужденными простоями на ремонт. Поэтому обеспечение требуемого уровня долговечности дробилки по критерию циклической прочности распорной плиты является актуальной практической задачей.

Прогнозирование гамма-процентного ресурса распорной плиты щековой дробилки СМД-110 проводилось в 4 этапа.

На первом этапе выполнялась оценка параметров нагружения распорной плиты согласно методикам работ [25, 26] для наиболее сложных условий эксплуатации, которые предполагают дробление куска породы размером 500 мм с пределом прочности на сжатие 285 МПа, с учетом того что его насыпная масса после дробления должна быть 1,8 т/м³. Для заданных условий определена величина сжимающего усилия, действующего на распорную плиту, которое составило 2,913 МН.

На втором этапе проведена оценка напряженного состояния материала распорной плиты как изотропной среды в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Основным вопросом при организации выполнения процедуры моделирования является определение типа и выбор метода наложения сетки конечных элементов. В данной работе рассматривались три варианта генерации конечно-элементной сетки: с использованием функции Adaptive remeshing и построением графика конвергенции; с уточнением размера конечного элемента в предполагаемом месте концентрации напряжений; формирование сетки с постоянным размером по всему объему исследуемого макрообъекта.

Первый вариант предполагает построение адаптивной сетки конечных элементов, уточняя её размер в соответствующих участках исследуемой детали на основе результатов оценки напряженного состояния, полученных в рамках предыдущей расчетной итерации. Данный метод реализуется с использованием функции Adaptive remeshing программного комплекса ABAQUS. Алгоритм выполнения расчетов с использованием функции Adaptive remeshing представляет собой последовательность следующих операций:

1. Выполнение первой расчетной итерации предполагает назначение постоянного размера конечного элемента сетки, для которого производится оценка напряженного состояния исследуемой распорной плиты, и определяются места концентрации максимальных напряжений.

2. Во второй расчетной итерации, по результатам оценки напряженного состояния (НС) предыдущего этапа, производится уточнение размера сетки конечных элементов в местах локализации максимальных напряжений, после чего расчет НС возобновляется. Данная операция повторяется в рамках каждой последующей расчетной итерации.

3. После выполнения всех расчетных итераций, число которых определяет исследователь самостоятельно, выполняется построение графика конвергенции и соответствующая проверка сходимости результатов. Расчет признается выполненным, а его результаты корректными, если разница между значениями напряжений, полученных на текущем и предыдущем шаге вычислений, не превышает установленный предел. Если процент расхождения результатов превышает установленное значение, то моделирование напряженного состояния исследуемого объекта продолжается с уточнением размера конечного элемента сетки в местах концентрации напряжений.

Результаты оценки напряженного состояния распорной плиты для первого варианта генерации сетки конечных элементов представлены на рисунке 3а.

Моделирование напряженного состояния проводилось с использованием решателя Static General. Исходными данными для расчета являлись физические и механические характеристики серого чугуна марки СЧ-20 [27] такие как плотность, модуль упругости, предел текучести, а также параметры нагружения в виде усилия сжатия, действующего на распорную плиту. Генерация сетки осуществлялась десятиузловым тетраэдрическим элементом С3D10М с исходным размером 20 мм, количество которых составило 64945. При использовании функции Adaptive remeshing установлены следующие условия сходимости:

- локальный тип сходимости (конвергенции) размещения конечных элементов сетки;
- число расчетных итераций 15;
- процент расхождения результатов не должен превышать 1 %.

На рисунке 3б представлен график конвергенции, полученный в результате моделирования напряженного состояния распорной плиты с использованием функциональных возможностей Adaptive remeshing. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составили 141,014 МПа и были определены по результатам девятой расчетной итерации. Ошибка расхождения значений напряжений Мизеса на 8-ой и 9-ой расчетных итерациях составила 0,73 %, что в свою очередь удовлетворяет установленному критерию.

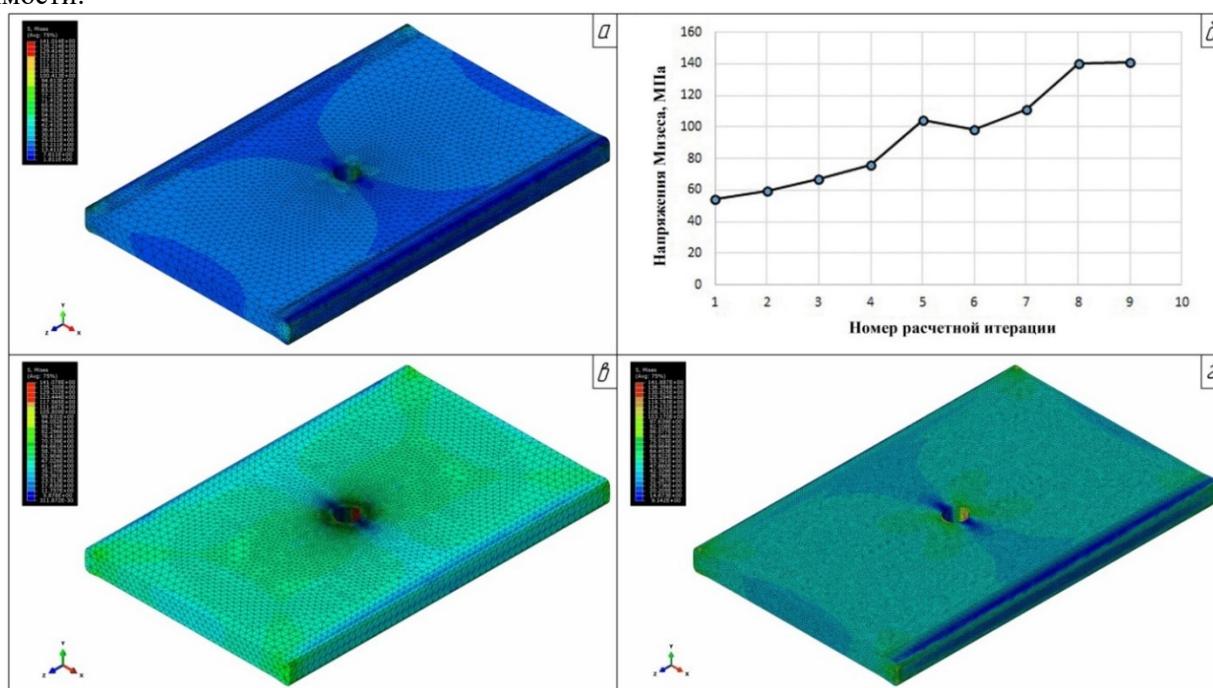


Рис. 3. Результаты оценки напряжений Мизеса макромодели распорной плиты:

- а) построение сетки с использованием Adaptive remeshing, б) график конвергенции (сходимости) при выполнении моделирования с использованием Adaptive remeshing, в) уточнение размеров сетки в предполагаемом месте концентрации напряжений, г) фиксированный размер конечного элемента сетки

В рамках девятой расчетной итерации 3d модель распорной плиты включала в себя 159569 конечных элементов.

В ходе моделирования напряженного состояния установлено, что место концентрации максимальных напряжений возникает в отверстии, расположенном в центральной части распорной плиты, что в свою очередь подтверждается практикой эксплуатации, так как именно в этом месте происходит зарождение усталостной трещины и последующее разрушение.

Второй вариант генерации конечно-элементной сетки предполагал её наложение с фиксированным значением размера по всему объему

трехмерной модели распорной плиты за исключением места, в котором наиболее вероятно появление концентраторов напряжений, в данном случае отверстия в её центральной части. В области отверстия размер конечных элементов не превышал 5 мм, когда как величина в остальном объеме составляла 20 мм.

Графическое представление результатов оценки напряженного состояния распорной плиты с использованием второго способа генерирования сетки конечных элементов отображено на рисунке 3в. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составили 141,078 МПа.

Расхождение результатов между первым и вторым способом оказалось незначительным.

Третий вариант наложения сетки конечных элементов подразумевает её формирование по всему объёму исследуемой трехмерной модели распорной плиты с постоянным значением размера, принятым 5 мм. В этом случае модель распорной плиты включала в себя 932192 элемента. Результаты моделирования напряженного состояния представлены на рисунке 3г. Как и предполагалось, концентрация максимальных напряжений была выявлена в районе центрального отверстия, что в свою очередь подтверждается практикой эксплуатации. Величина максимальных напряжений по Мизесу составила 141,887 МПа.

Следует отметить, что для всех трёх вариантов генерации сетки результаты моделирования

незначительно отличались друг от друга. Однако необходимо учитывать, что для последующей постановки задачи микроструктурного моделирования наиболее предпочтительным будет третий вариант, предполагающий наложение сетки с постоянным размером конечного элемента по всему объёму исследуемого макрообъекта.

На третьем этапе проведена процедура микроструктурного моделирования напряженного состояния серого чугуна марки СЧ-20 с учетом его анизотропии, используемого для изготовления исследуемой распорной плиты. Схема, отражающая принцип организации микроструктурного моделирования НС отображена на рисунке 4.

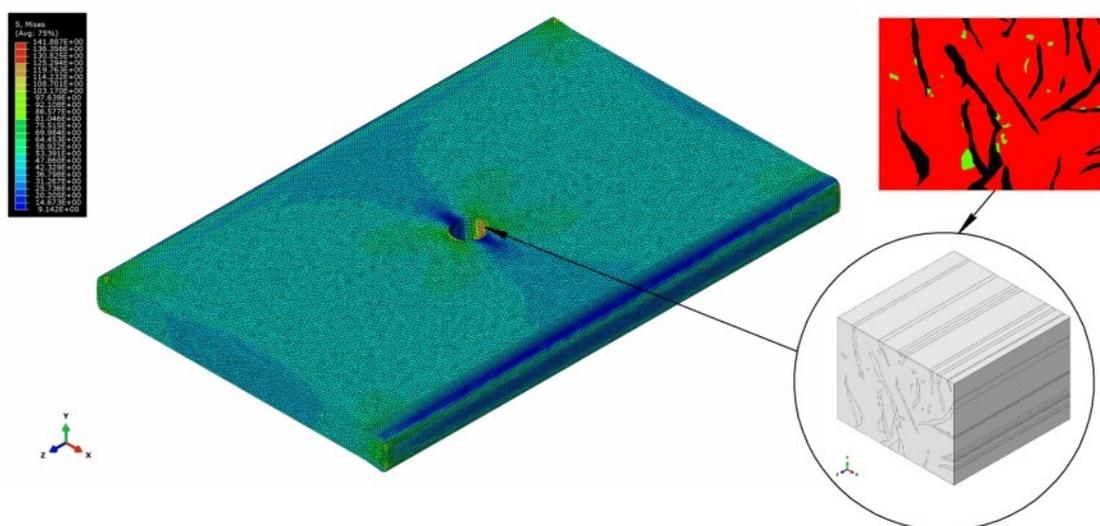


Рис. 4. Принципиальная схема проведения микроструктурного моделирования напряженного состояния СЧ-20 распорной плиты щековой дробилки СМД-110

Микроструктурное моделирование напряженного состояния материала предполагает формирование трехмерной модели элементарного репрезентативного объема (RVE) на основе результатов его структурного анализа, выраженных в виде снимка с выделением отдельных фаз (см. рис. 1б и рис. 4). Неотъемлемым условием является соответствие геометрических размеров каждого структурного компонента RVE, тем, что установлены в результате микроструктурного анализа образцов реального материала.

Трехмерная модель RVE формируется на основе выполнения операции векторизации изображения, отображенного на рисунке 1б, при этом вводится допущение о том, что в любом сечении репрезентативного объема должно сохраняться процентное соотношение структурных компонентов с соблюдением масштабного фактора и его соответствия снимку на рисунке 1а.

После получения модели репрезентативного объема каждой структурной составляющей, в

данном случае перлиту, ферриту и графиту, производится присвоение значений физических и механических характеристик, согласно результатам исследований, опубликованных в работах [28–30]. В качестве исходных параметров, определяющих свойства структурных составляющих RVE, были приняты: модуль упругости, значения которого были определены при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011 (см. табл. 1), коэффициент Пуассона, плотность, кривые текучести [28–30].

Для выполнения процедуры оценки напряженного состояния сформированного единичного элементарного репрезентативного объема используются функциональные возможности субмоделирования (Submodeling), реализованные в программной среде ABAQUS. Условиями нагружения RVE будут являться результаты расчета напряженного состояния макро модели распорной плиты щековой дробилки (рис. 3г). Формирование сетки осуществляется десятиузловым

тетраэдрическим элементом С3D10М. Количество конечных элементов в сформированном репрезентативном объеме составляло 334618.

На рисунке 5 представлены результаты оценки главных и эквивалентных напряжений Мизеса репрезентативного объема серого чугуна

марки СЧ-20. С целью более детального анализа полученных результатов, на рисунке 5 представлено сечение репрезентативного объема, в котором отображаются места локализации максимальных напряжений.

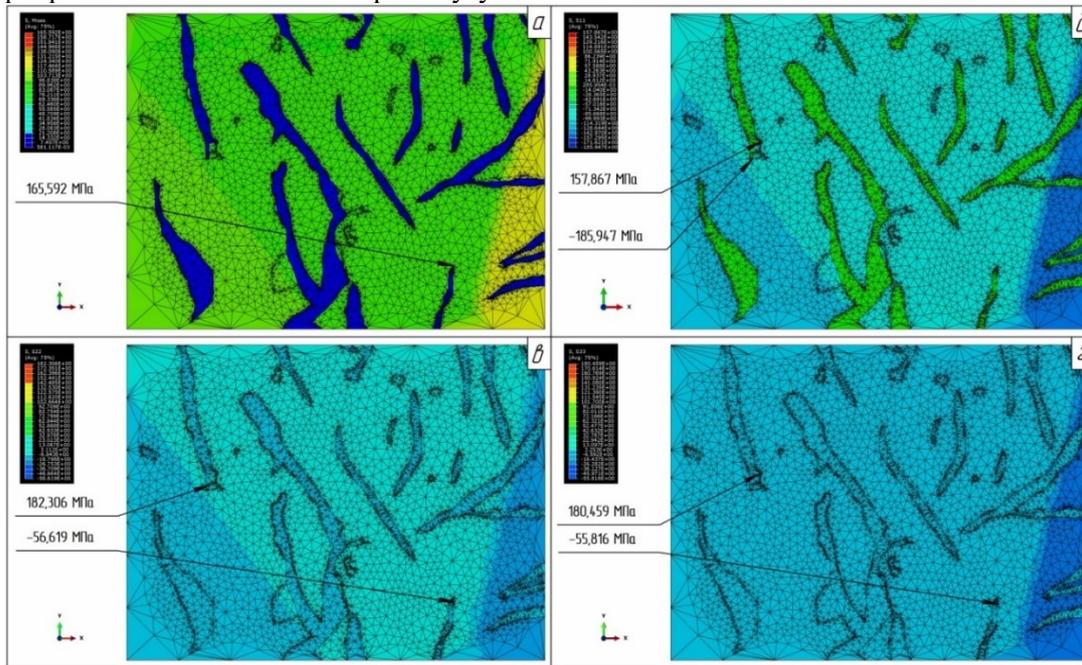


Рис. 5. Результаты оценки напряженного состояния RVE серого чугуна марки СЧ-20:

а) напряжения Мизеса, б) напряжения σ_x (S11), в) напряжения σ_y (S22), г) напряжения σ_z (S33)

Результаты теоретических исследований напряженного состояния репрезентативного объема чугуна марки СЧ-20 представлены в таблице 2, в которой отображены значения главных, эквивалентных и касательных напряжений для каждой структурной составляющей.

Напряжения, обозначенные на рисунке 5 и в таблице 2, имеющие положительное значение – растягивающие, а отрицательные – напряжения сжатия.

Таблица 2

Результаты исследования напряженного состояния репрезентативного объема СЧ-20 распорной плиты дробилки СМД-110

Напряжения, МПа	Структурная составляющая материала					
	Перлит		Феррит		Графит	
Напряжения Мизеса $\sigma_{экв}$ (S)	165,592		145,923		14	
σ_x (S11)	Раст.	–	Раст.	157,867	Раст.	25,587
	Сжат.	-185,947	Сжат.	-148,326	Сжат.	-66,125
σ_y (S22)	Раст.	22,375	Раст.	182,306	Раст.	14,667
	Сжат.	-38,595	Сжат.	-20,901	Сжат.	-56,619
σ_z (S33)	Раст.	13,605	Раст.	180,459	Раст.	13,368
	Сжат.	-46,414	Сжат.	-25,999	Сжат.	-55,816
τ_{xy} (S12)	Раст.	65,390	Раст.	19,310	Раст.	8,043
	Сжат.	-60,226	Сжат.	-23,996	Сжат.	-8,035
τ_{xz} (S13)	Раст.	11,685	Раст.	113,477	Раст.	1,020
	Сжат.	-21,403	Сжат.	-65,551	Сжат.	-1,826
τ_{yz} (S23)	Раст.	5,687	Раст.	7,034	Раст.	1,159
	Сжат.	-14,219	Сжат.	-25,278	Сжат.	-1,440

Примечание. Знак «-» показывает характер (направление действия) напряжений и деформации, в данном случае напряжения сжатия.

Ввиду особенностей строения серых чугунов и их поведения при действии различных

условий нагружения, принимается, что определяющее значение при оценке работоспособности

деталей будут являться главные напряжения [27]. Более того, анализ напряженного состояния исследуемого репрезентативного объема показал, что для него характерно возникновение, как напряжений сжатия, так и растягивающих напряжений. Однако следует учитывать, что для металлических материалов сжимающие напряжения, согласно [31], не вызывают процесс трещинообразования и не приводят к разрушению.

Согласно работе [32], вследствие действия растягивающих напряжений серые чугуны разрушаются вязко с наличием ямочного излома, которому соответствует транскристаллитное разрушение [33]. Поскольку структура серого чугуна представляет собой металлическую основу с графитовыми включениями, размер и процент содержания которых определяет его механические характеристики, в этом случае следует учитывать, что пластинчатый графит является источником возникновения концентраторов напряжений на границах с зернами перлита и феррита [1, 32]. Ввиду того, что графит в сравнении с перлитом и ферритом обладает значительно более низкими механическими характеристиками, то в определенных случаях его рекомендуется считать пустотами или трещинами в металлической основе [1, 32]. Результаты компьютерного анализа напряжённого состояния исследуемого репрезентативного объема серого чугуна марки СЧ-20, представленные на рисунке 5 и в таблице 2, подтверждают данные утверждения. Во всех случаях концентраторы напряжений, которые в той или иной степени могут быть причиной образования трещин, выявлены на границах с графитовыми включениями.

На следующем этапе исследований проведена процедура верификации предлагаемых теоретических решений, предполагающая сравнение расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной, установленной нормативно-технической документацией исследуемой щековой дробилки.

Согласно требованиям руководства по эксплуатации дробилки СМД-110, средний ремонт, в рамках которого производится замена распорной плиты и сухарей механизма регулирования разгрузочной щели, осуществляется каждые 2400 часов. Таким образом, для обеспечения бесперебойной и стабильной работы дробилки, в случае отсутствия в камере дробления недробимых материалов, ресурс распорной плиты в рассматриваемых условиях эксплуатации должен превышать установленное значение периодичности текущих ремонтов.

На основе результатов моделирования напряженного состояния исследуемого репре-

зентативного объема с использованием предлагаемой методики (3) – (9), а также экспериментально полученных значений микротвердости HV_{μ} и модуля упругости E_{IT} структурных составляющих серого чугуна марки СЧ-20 при инструментальном индентировании по ГОСТ Р 8.748-2011 рассчитаны величины показателей долговечности распорной плиты щековой дробилки СМД-110 для заданных условий эксплуатации: средний ресурс (ресурс с вероятностью безотказной работы 50 %) составил 3314 часов и девяностопроцентный ресурс 2830 часов. Коэффициент вариации не превышает 11 %.

Исходными данными, в качестве случайных величин имеющих рассеяние, приняты микротвердость HV_{μ} и модуль упругости E_{IT} , значения которых определены в ходе экспериментальных исследований и представлены в таблице 1.

Аналитически полученные значения ресурса превышают установленный нормативно-технической документацией, что в свою очередь свидетельствует о работоспособности распорной плиты и подтверждается практикой эксплуатации.

Поскольку щековая дробилка СМД-110, согласно [16], относится к технологическому оборудованию первого класса надежности, полагаем, что величина межремонтного периода, установленного руководством по эксплуатации, соответствует девяностопроцентному ресурсу. В этом случае, ошибка прогнозирования не превышает 18 %.

Учитывая полученные результаты, можно заключить, что предлагаемая методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния обладает достаточным уровнем достоверности.

Выводы.

1. Разработана методика оценки гамма-процентного ресурса деталей металлургического оборудования, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния. Она предполагает совместное использование известных зависимостей для оценки среднего ресурса деталей механического оборудования по критерию кинетической прочности, метода линеаризации случайных аргументов, позволяющего оценить дисперсию исследуемой функции и инструментов микроструктурного моделирования напряженного состояния материала. К отличительным особенностям предлагаемой методики, определяющим значимые научные результаты, следует отнести: математические зависимости, позволяющие рассчитать

дисперсии параметров необходимых для оценки ресурсных характеристик исследуемого объекта; возможность учета анизотропии реальной структуры серых чугунов при выполнении процедуры вычисления показателей долговечности нагруженных деталей металлургического оборудования.

2. Проведена процедура верификация предлагаемой методики путем сравнения расчетных значений гамма-процентного ресурса с величиной установленной нормативной документацией исследуемого технического объекта. В качестве объекта исследований рассмотрена распорная плита щековой дробилки СМД-110, изготавливаемая из серого чугуна марки СЧ-20. Ошибка прогнозирования девяностопроцентного ресурса не превышает 18 %.

3. Представленные в настоящей статье решения могут быть использованы на стадиях проектирования и эксплуатации деталей металлургического оборудования, изготовленных из серых чугунов, для выполнения процедуры предиктивной вероятностной оценки показателей их долговечности, а также при формировании структуры периодичности ремонтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. Конструкционные материалы: Справочник. М. Машиностроение, 1990. 688 с.
2. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. М.: Высш. шк., 2008. 408 с.
3. Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics 4th Edition / Edited by Myer Kutz. 2015. P. 1040
4. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-1. Детали машин Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. М.: Машиностроение, 1995. 864 с.
5. Гусев А.С., Даниленко К.Б., Стародубцева С.А. Вероятностная оценка появления в элементах конструкций усталостных повреждений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №3. С. 3–9. DOI 10.18698/0536-1044-2016-3-3-9
6. Евграфов В.А., Орлов Б.Н. Прогнозирование усталостной долговечности деталей почвообрабатывающих машин с учетом механики разрушения // ТРУДЫ ГОСНИТИ. 2009. Т. 103. С. 103–106
7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопrotивление материалов: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
8. Ключев В.В., Болотин В.В., Соснин Ф.Р. и др. Надежность машин. Т. IV-3. М.: Машиностроение. 2003. 592 с.
9. Халикова О.Р., Кутлубаев И.М., Макаров А.Н., Усов И.Г. Электронная база данных для организации технического обслуживания и ремонта металлургического оборудования // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. №3. С. 37–41.
10. Панфилова О.Р., Великанов В.С., Усов И.Г., Мацко Е.Ю., Кутлубаев И.М. Расчет ресурса деталей структурно-функциональных элементов горных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 43–51.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2002. 575 с.
12. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Том 60. №1. С. 30–35
13. Анцупов А.В., Анцупов А.В., Слободянский М.Г., Анцупов В.П. Проектная оценка повреждаемости материалов и долговечности образцов при испытании их на разрывной машине // Механическое оборудование металлургических заводов, 2013. Вып. 2. С. 70–76
14. Анцупов В.П., Дворников Л.Т., Громяковский Д.Г., Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 141–146.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020618192 Российская Федерация. Долговечность деталей машин / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, Ю.С. Ляшева, М.Г. Слободянский // Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2020617272; заявл. 16.07.2020; опублик. 22.07.2020. 1 с.
16. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ имени Баумана, 2003. 536 с.
17. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1985. 165 с.
18. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Основы эргодинамики деформируемых тел. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. Ч.3. 222 с.
19. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов:

монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308 с.

20. Воронин С.В., Бунова Г.З., Юшин В.Д. Компьютерное исследование влияния реальной структуры материалов на характер распространения трещин в хрупких анизотропных телах // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 4. С. 72–77

21. Huang X., Wang J., Zhao S., Yao Z., Liu C. High-resolution multiscale modeling of mechanical behavior of cold-drawn pearlitic steels // J Mater Res Technol. 2021. Vol. 15. Pp. 5920–5935 DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.087

22. Polyakova M., Konstantinov D., Korchunov A., Dabala' M. The Use the Concept of Multiscale Simulation to Improve the Topology of TRIP-Steel Parts Operating Under Extreme Loads. Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 196–206 DOI:10.1007/978-3-031-14125-6_20

23. Etse G., Caggiano A., Vrech S. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model // Int J Fract. 2012. Vol. 178. Pp. 131–146. DOI:10.1007/s10704-012-9733-z

24. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 36–43

25. Шарипов Л.Х. Щековые дробилки. Конструкции и расчеты. Учебное пособие. Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. 2016. 84 с.

26. Клушанцев Б.В. Дробилки. Конструкция, расчёт и особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.

27. Шерман А.Д., Жуков А.А. Чугун: справочник. М.: Металлургия, 1991. 575с.

28. Tomota Y., Umamoto M., Komatsubara, N. Prediction of mechanical properties of multi-phase steels based on stress-strain curves // ISIJ International. 1992. №32(3). Pp. 343–349.

29. Basantia S.K., Bhattacharya A, Khutia N, Das D. Plastic behavior of ferrite–pearlite, ferrite–bainite and ferrite–martensite steels: experiments and micromechanical modelling // Metal Mater Int. 2021. №27. Pp. 1025–1043.

30. Balzani D., Schroder J. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations // Proc. Appl. Math. Mech. 2008. №8. Pp. 10533–10534.

31. Жарский И.М. Материаловедение: учебное пособие. Минск: Высшая школа, 2015. 557 с.

32. Гуляев А.П. Материаловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

33. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

Информация об авторах

Слободянский Михаил Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация металлургических машин и оборудования». E-mail: m.slobodianskii@gmail.com. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Россия, 455000, Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38.

Поступила 15.02.2024 г.

© Слободянский М.Г., 2024

Slobodianskii M.G.

Nosov Magnitogorsk State Technical University

E-mail: m.slobodianskii@gmail.com

FAILURE PREDICTION OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS BY STRENGTH CRITERIA, MADE OF GREY CAST IRON, ON THE BASIS OF MICROSTRUCTURAL MODELLING OF STRESS STATE

Abstract. The article proposes a methodology for estimating the gamma-percent life of metallurgical equipment parts made of grey cast iron on the basis of micro structural modelling of its stress state, which is formulated using known relationships for estimating the average life of mechanical equipment parts by the criterion of kinetic strength, the linearisation method of random arguments allowing to estimate the variance of the function under study and tools of micro structural modelling of the stress state of the material. It allows at the stages of design and operation to take into account the all-round influence of loading conditions of the investigated technical object, its operating temperature, physical and mechanical characteristics of structural components of grey cast iron on gamma-percent resource. Its main distinctive features are mathematical dependences allowing estimating the value of dispersion of parameters necessary for calculation of resource characteristics, as well as the possibility of taking into account the anisotropy of the real structure of grey cast

iron. In addition, the procedure of verification of the proposed methodology by comparing theoretically obtained values of gamma-percent resource with the value established in the normative and technical documentation is carried out. The spacer plate of SMD-110 jaw crusher, made of grey cast iron of GI-20 grade, is considered as an object of research physical and mechanical characteristics of its structural components, such as modulus of elasticity and Vickers micro hardness were experimentally evaluated using the method of instrumental indentation. The prediction error does not exceed 18%, which in turn confirms a sufficient level of reliability of the theoretical solutions proposed in this article, which can be used in the design of metallurgical equipment parts made of grey cast iron, as well as in the formation of the periodicity structure of its repairs.

Keywords: gamma-percentage resource, durability, metallurgical equipment, stress state, microstructural modeling, gray cast iron.

REFERENCES

1. Arzamasov B.N., Brostrom V.A., Bush N.A. et al. Structural materials: Directory [Konstrukcionnye materialy: Spravochnik] M. Mechanical Engineering, 1990. 688 p. (rus)
2. Ivanov M.N., Finogenov V.A. Machine parts: Textbook for mechanical engineering specialties at universities [Detali mashin: Uchebnik dlya mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov]. M.: Higher school, 2008. 408 p. (rus)
3. Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics 4th Edition / Edited by Myer Kutz. 2015. P. 1040
4. Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. IV-1. Machine parts Structural strength. Friction, wear, lubrication [Mashinostroenie. Enciklopediya. T. IV-1. Detali mashin Konstrukcionnaya prochnost'. Trenie, iznos, smazka]. M.: Mechanical Engineering, 1995. 864 p. (rus)
5. Gusev A.S., Danilenko C.B., Starodubtseva S.A. Probabilistic Estimation of Fatigue Damage in Structural Elements [Veroyatnostnaya ocenka poyavleniya v elementah konstrukcij ustalostnyh povrezhdenij]. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2016. No. 3. Pp. 3–9. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-3-3-9
6. Evgrafov V.A., Orlov B.N. Forecasting the fatigue life of parts of soil-cultivating machines taking into account the mechanics of destruction [Prognozirovanie ustalostnoj dolgovechnosti detalej pochvoobrabatyvayushchih mashin s uchedom mekhaniki razrusheniya]. PROCEEDINGS OF GOSNITI. 2009. Vol. 103. Pp. 103–106 (rus)
7. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Strength of materials: Textbook for universities [Soprotivlenie materialov: Ucheb. dlya vuzov]. M.: Higher school, 2003. 560 p. (rus)
8. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. et al. Machine reliability. Vol. IV-3. [Nadezhnost' mashin. T. IV-3] M.: Mechanical Engineering. 2003. 592 p. (rus)
9. Khalikova O.R., Kutlubaev I.M., Makarov A.N., Usov I.G. Electronic database for organizing maintenance and repair of metallurgical equipment [Elektronnaya baza dannyh dlya organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta metallurgicheskogo oborudovaniya]. Repair, Reconditioning, Modernization. 2008. No. 3. Pp. 37–41. (rus)
10. Panfilova O. R., Velikanov V. S., Usov I. G., Matsko E. Yu., Kutlubaev I. M. Calculation of the service life of structural and functional elements parts of mining machines [Raschet resursa detalej strukturno-funkcional'nyh elementov gornyh mashin]. Fizikotekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. 2018. No. 2. Pp. 43–51. (rus)
11. Ventzel E.S. Probability theory: textbook for universities [Teoriya veroyatnostej: ucheb. dlya vuzov]. M.: Higher school, 2002. 575 p. (rus)
12. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. Analytical method for design assessment of the service life of metallurgical machines elements. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 2017. Vol. 60. No. 1. Pp. 30–35. (rus)
13. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Slobodianskii M.G., Antsupov V.P. Design assessment of the damageability of materials and durability of samples when tested on a tensile testing machine [Proektnaya ocenka povrezhdaemosti materialov i dolgovechnosti obrazcov pri ispytanii ih na razryvnoj mashine]. Mechanical equipment of metallurgical plants, 2013. Issue. 2. Pp. 70–76 (rus)
14. Antsupov V.P., Dvornikov L.T., Gromakovsky D. G., Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V. Fundamentals of the physical theory of reliability of machine parts according to the criteria of kinetic strength of materials [Osnovy fizicheskoy teorii nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti materialov]. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2014. No. 1. Pp. 141–146. (rus)
15. Antsupov A.V., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Lyasheva Yu.S., Slobodyansky M.G. Certificate of state registration of a computer program 2020618192 RF. Applied: 16.07.2020. Published: 22.07.2020. (rus)
16. Pronikov A. S. Parametric reliability of machines [Parametricheskaya nadezhnost' mashin]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2003. 536 p. (rus)
17. Fedorov V.V. Kinetics of damage and destruction of solids [Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tverdyh tel]. Tashkent: Izdatelstvo "Fan" UzSSR, 1985. 165 p. (rus)

18. Fedorov V.V. Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies. Fundamentals of ergodynamics of deformable bodies. Part 3 [Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemykh tel. Osnovy ergodinamiki deformiruemykh tel]. Kaliningrad: Izdatelstvo FGBOU VPO "KGTU", 2014. 222 p. (rus)
19. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. Theory and Practice of Assurance of Machine Element Reliability according to Criteria of Material Kinetic Strength and Wear Resistance: monograph [Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti detalej mashin po kriteriyam kineticheskoy prochnosti i iznosostojkosti materialov: monografiya]. Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., Magnitogorsk. 2015. 308 p. (rus)
20. Voronin S.V., Bunova G.Z., Yushin V.D. A computer-aided study of how a real structure of materials influences a character of crack propagation in brittle anisotropic bodies [Komp'yuternoe issledovanie vliyaniya real'noj struktury materialov na karakter rasprostraneniya treshchin v hrupkih anizotropnykh telakh]. Problems of mechanical engineering and automation [Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii]. 2006. No. 4. Pp. 72–77. (rus)
21. Huang X., Wang J., Zhao S., Yao Z., Liu C. High-resolution multiscale modeling of mechanical behavior of cold-drawn pearlitic steels. J Mater Res Technol. 2021. Vol. 15. Pp. 5920–5935 DOI.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.087
22. Polyakova M., Konstantinov D., Korchunov A., Dabala' M. The Use the Concept of Multiscale Simulation to Improve the Topology of TRIP-Steel Parts Operating Under Extreme Loads. Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. Pp. 196–206 DOI:10.1007/978-3-031-14125-6_20
23. Etse G., Caggiano A., Vrech S. Multiscale failure analysis of fiber reinforced concrete based on a discrete crack model. Int J Fract. 2012. Vol. 178. Pp. 131–146. DOI:10.1007/s10704-012-9733-z
24. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. Multi-scale computer modeling of plastic metal working processes [Mul'timasshtabnoe komp'yuternoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem]. Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2015. Pp. 36–43. (rus)
25. Sharipov L.Kh. Jaw crushers. Designs and calculations. Tutorial [Shchekovye drobilki. Konstrukcii i raschety. Uchebnoe posobie]. Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 2016. 84 p. (rus)
26. Klushantsev B.V. Crushers. Design, calculation and operating features [Droibilki. Konstrukciya, raschyot i osobennosti ekspluatacii]. M.: Mechanical Engineering, 1990. 320 p. (rus)
27. Sherman A.D., Zhukov A.A. Cast iron: reference book [CHugun: spravochnik]. M.: Metallurgy, 1991. 575 p. (rus)
28. Tomota Y., Umemoto M., Komatsubara, N. Prediction of mechanical properties of multi-phase steels based on stress-strain curves. ISIJ International. 1992. No.32. Vol. 3. Pp. 343–349.
29. Basantia S.K., Bhattacharya A, Khutia N, Das D. Plastic behavior of ferrite–pearlite, ferrite–bainite and ferrite–martensite steels: experiments and micromechanical modelling. Metal Mater Int. 2021. No.27 Pp.1025-1043.
30. Balzani D., Schroder J. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations. Proc. Appl. Math. Mech. 2008. No.8. Pp. 10533–10534.
31. Zharsky I.M. Materials science: textbook [Materialovedenie: uchebnoe posobie]. Minsk: Higher School, 2015. 557 p. (rus)
32. Gulyaev A.P. Materials Science [Materialovedenie]. M.: Metallurgy, 1986. 544 p. (rus)
33. Lakhtin Yu.M., Leontyeva V.P. Materials Science [Materialovedenie]. M.: Mechanical Engineering, 1990. 528 p. (rus)

Information about the authors

Slobodianskii, Mikhail G. PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment. E-mail: m.slobodianskii@gmail.com. Nosov Magnitogorsk State Technical University. Russian Federation, 455000, Magnitogorsk city, Lenin Street, 38.

Received 15.02.2024

Для цитирования:

Слободянский М.Г. Прогнозирование отказов деталей металлургического оборудования по критериям прочности, изготовленных из серого чугуна, на основе микроструктурного моделирования напряженного состояния // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 90–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106

For citation:

Slobodianskii M.G. Failure prediction of metallurgical equipment parts by strength criteria, made of grey cast iron, on the basis of microstructural modelling of stress state. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 90–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-90-106

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-107-115

Пахомов Е.Г., Романович А.А., Романович М.А., Дядин М.О.Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: evgniyp@mail.ru*

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ СМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. В статье представлено описание экспериментальной установки энергосберегающего смесителя для приготовления сухих строительных смесей. Установка состоит из приемного устройства для загрузки различных компонентов, камеры смесительной, включающей в себя два вала с лопастями, позволяющими интенсифицировать процесс движения компонентов смеси, и тем самым уменьшить время на их перемешивания. Валы приводятся в движение от двух электродвигателей, для разгрузки готовой смеси предусмотрена задвижка, установленная в нижней части смесительной камеры, управление которой с целью быстрого срабатывания осуществляется пневматической системой. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по установлению влияния конструктивно-технологических параметров смесителя: угла наклона лопаток, окружной скорости их вращения и времени перемешивания на качественные характеристики процесса смешивания сухих строительных смесей. Установлено, что увеличение угла наклона лопаток приводит к повышению мощности, затрачиваемой на осуществление процесса перемешивания компонентов. Это связано с тем, что при увеличении угла наклона лопатки сопровождается повышением сопротивления перемешиванию, так как возрастает площадь её соприкосновения со смесью. Повышение частоты вращения роторов влечет за собой пропорциональный рост мощности. При угле наклона лопаток равном 45° к направлению её движения достигается наилучший результат приготовления смеси.

Ключевые слова: энергосберегающий смеситель, лопасть, сухая строительная смесь.

Введение. В строительном комплексе России ощущается дефицит сухих строительных смесей (ССС), применяемых для отделочных работ, так как многие зарубежные компании в последние годы ушли с Российского рынка.

Крупные отечественные компании, которые в настоящее время обеспечивают более 50 % спроса на сухие строительные смеси, учитывают эти условия и стараются восполнить российский рынок хотя бы с таким же уровнем производства [1–3], но это достаточно сложно. Конечно, доли крупных производителей на рынке со временем меняются, но движение изменений достаточно плавное. Всего в России около 250 различных предприятий, включая небольшие, которые производят сухие материалы общестроительного и специального назначения. К таким производствам относят: получение строительных сухих строительных смесей, пигмента красок, клеевых смесей, строительных и других шихтовых материалов. Однако существующих производственных мощностей в стране недостаточно для покрытия создавшегося дефицита сухих строительных смесей [1].

Восполнить рынок сухих строительных смесей позволило бы создание новых компактных высокоэффективных технологий для малых и средних инвестиционных предприятий.

Однако отсутствие высокопроизводительного компактного оборудования, входящего в состав технологии по производству этих смесей,

создает значительные трудности малому и среднему бизнесу для быстрого перехода на выпуск сухих строительных смесей. Так как, эти предприятия обладают, как правило, небольшими производственными площадями и ресурсами.

В технологии производства сухих строительных смесей одной из важнейших стадий является процесс смешивания дисперсных компонентов, который осуществляется в смесителях различного типа и во многом определяет производительность по выпуску готовой продукции. На многих производствах для получения таких продуктов до настоящего времени применяют лопастные смесители периодического действия, которые относятся к машинам, скорость вращения рабочих органов, которых обычно не превышает 150 мин^{-1} . В этих смесителях для смешения и осевого перемещения сыпучих материалов служат лопатки, спирали, прерывистые витки шнека или винтовые ленты, закрепленные на одном или двух параллельных валах, пропущенных через корпус смесителя. Сечение корпуса этих смесителей может иметь одну из следующих форм: цилиндрическую, корытообразную, овальную, перевернутой восьмерки и другие [4–7].

На сегодня во многих производствах применяют смесители, которые, как правило, реализуют не эффективный способ перемешивания (конструкция лопасти не позволяет создавать турбулизацию движения компонентов смеси), и

имеют достаточно большие габариты (так как горизонтально расположенный привод увеличивает габариты), что приводит к сложности в создании компактной технологии производства и тормозит увеличению объема выпуска готовой продукции [8–10, 12–15].

Проведенный анализ существующих конструкций смесителей, применяемых в производстве сухих строительных смесей показал, что наибольшее распространения получили смесители с горизонтальным или вертикальным расположением смесительных органов.

Представителем лопастных смесителей с горизонтальным расположением лопастных валов является смеситель периодического действия фирмы «ARDON» основанный на принципе ме-

ханического смешивания продукта. Форма, расположение и скорость вращения смесительных элементов создают центробежное вихревое движение, при котором частицы продукта интенсивно перемещаются в трёх плоскостях. В таком режиме обеспечивается высокое качество смешивания материалов с различным гранулометрическим составом и насыпной плотностью за определенное время. Однако недостатком данных смесителей являются большие габаритные размеры (рис.1, а), что требует дополнительных площадей на их размещение, или повышенная нагрузка, создаваемая от веса привода на подшипниковые опоры (рис.1, б), что требует усиления конструкции и, тем самым, увеличение его массы.

а)



б)



Рис. 1. Лопастные смесители фирмы «ARDON»:

а – с горизонтальным расположением привода; б – с вертикальным

Представителем лопастных смесителей с вертикальным расположением одного или двух лопастных валов являются смесители фирмы SATEC (рис. 2). В них применяется принцип противоточного перемешивания, который обеспечи-

вает оптимальную однородность смеси в заданные сроки. Благодаря совместному действию высокоскоростного ротора интенсивный смеситель SATEC позволяет добиться однородности смешивания компонентов [11].

а)



б)



Рис. 2. Лопастной смеситель с вертикальным расположением лопастных валов SATEC:

а – вид на смеситель; б – вид на ротор

Смесительный ротор, установленный вертикально с лопастями, наклоненными под определенным углом, транспортирует материал вверх

во время вращения, и когда материал достигает определенной высоты, он падает вниз под дей-

ствием силы тяжести, образуя грубое перемешивание смеси за счет горизонтального и вертикального движения её компонентов. Так как лопасти, оказывающие действие на перемешиваемый материал в конструкциях данных смесителей, представляют собой лопатку либо скребок, установленные в лучшем случае под определенным углом, что не позволяет создавать турбулентное движение, смешиваемых компонентов и тем самым требует большего времени для их качественного перемешивания. Наличие вертикального расположения привода приводит к затруднению процесса заполнения смесительного барабана компонентами смеси, так как их подаче препятствуют лопастные валы.

Таким образом, проведенный анализ существующих конструкций смесителей, применяемых в производстве сухих строительных смесей показал, что наибольшее распространения получили смесители с горизонтальным или вертикальным расположением смесительных органов. Однако недостатком горизонтальных смесителей являются большие габаритные размеры что требует дополнительных площадей на их размещение, а, повышенная нагрузка, создаваемая от веса привода на подшипниковые опоры, требует усиления конструкции и тем самым увеличение его массы. При вертикальном расположении привода приводит к затруднению процесса заполнения смесительного барабана компонентами, подлежащими перемешиванию. Как правило, рабочие органы данных смесительных агрегатов

представляют собой лопатку либо скребок, установленные под определенным углом, что не позволяет создавать интенсивное движение смешиваемых компонентов и тем самым требует большего времени перемешивания.

Поэтому проведение исследований, направленных на совершенствование существующих конструкций и создание новых смесителей является наиболее актуальной задачей, стоящей перед инженерами в области разработки оборудования для производства сухих строительных смесей.

Целью работы является описание и исследование новой компактной конструкции смесителя, позволяющего сократить время на приготовления смесей.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

- описать конструкцию смесителя с эффективным рабочим органом;
- исследовать влияние угла наклона лопаток, окружной скорости их вращения и времени перемешивания на выходные показатели агрегата и установить их рациональные параметры.

Материалы и методы. Учеными БГТУ им. В.Г. Шухова разработана экспериментальная установка энергосберегающего смесителя для приготовления сухих строительных смесей [5, 9], позволяющая в значительной степени ликвидировать, указанные выше недостатки (рис 3).

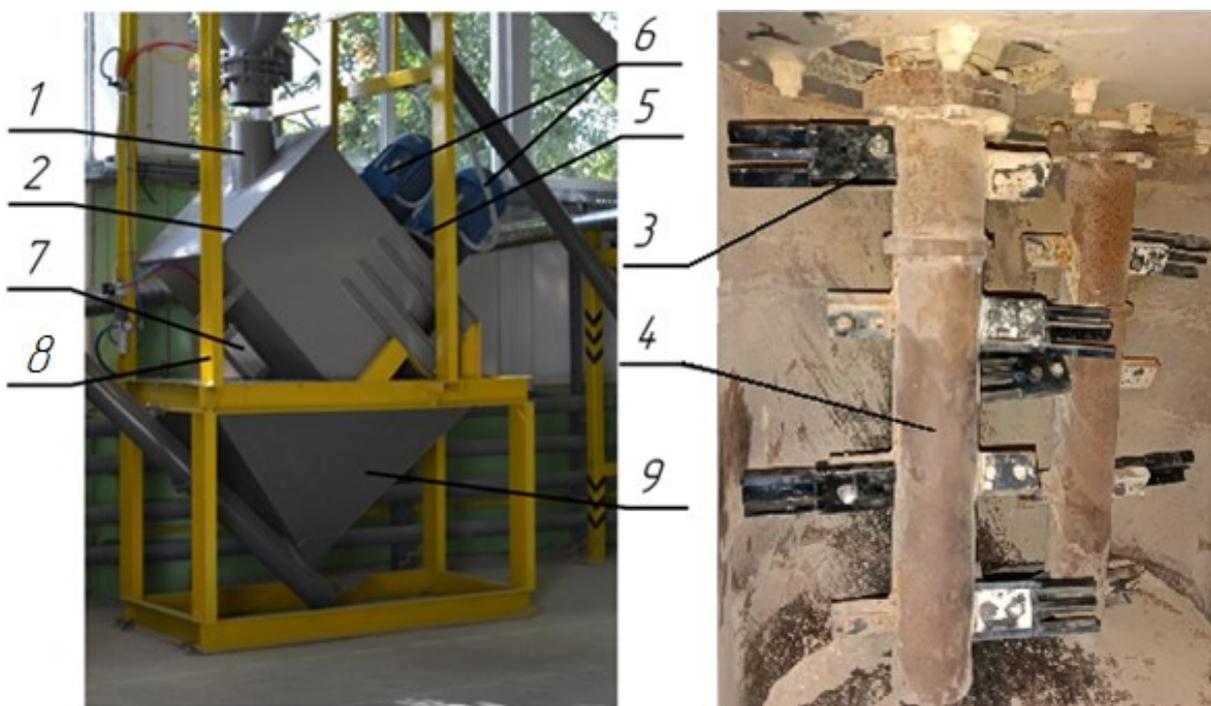


Рис. 3. Экспериментальная установка энергосберегающего смесителя:

1 – приемное устройство, 2 – камера смесителя, 3 – лопасть, 4 – вал, 5 – крепление силового агрегата, 6 – электродвигатель, 7 – пневмоцилиндр, 8 – рама, 9 – накопительный бункер

Смеситель имеет следующие технические характеристики: габаритные размеры – 1850×880×1600 мм; диаметр ротора с лопатками – 474 мм; мощность привода – 2×7,5 кВт, объем смесительной чаши – 0,37 м³.

Установка состоит из следующих основных частей: приемного устройства 1 для загрузки различных компонентов, камеры смесительной 2, включающей в себя два вала 4 с лопастями 3, позволяющими интенсифицировать процесс движение компонентов смеси, и тем самым уменьшить время на их перемешивания. Валы приводятся в движение от двух электродвигателей 6, установленных на корпусе смесительной камеры. Для разгрузки готовой смеси предусмотрена задвижка, расположенная в нижней части смесительной камеры, управление которой с целью быстрого срабатывания осуществляется пневматической системой 7. Готовая продукция подается в накопительный бункер 9. Для лучшего заполнения камеры исходными компонентами и уменьшения нагрузки на подшипниковые узлы валов от привода, корпус смесителя установлен на раме 8 под углом 45°, что позволяет придать смесителю более компактную форму и способствует лучшему заполнению смешиваемыми компонентами.

В верхней части смесительной камеры расположено приемное устройство, над которым может устанавливаться бункер-дозатор или любое другое загрузочное устройство, обеспечивающее дозирование подлежащих смешиванию компонентов.

Конструкция лопасти 3 смесителя (рис. 4) представляет собой жестко установленные на основании три лопатки, причем первая из них повернута на угол 45° относительно продольной оси основания, а следующие лопатки повернуты друг относительно друга на угол $\alpha = 90^\circ$. Такое расположение лопаток позволит создавать меньшее сопротивление движению лопастей, так как уменьшается площадь их лобовой атаки и интенсифицировать процесс перемешивания.

Угловое положение лопастей относительно направления вращения вызывает перемещение

материала как вдоль оси вращения, так и вдоль продольной оси смесителя, что приводит к сложным перемещениям материала внутри смесителя.

Механика процесса смешивания в лопастном смесителе осуществляется следующим образом: при вращении рабочего органа, лопасти, следуя друг за другом, оставляют в массе смеси следы, копирующие их форму и непрерывно заполняемые близлежащим материалом; в результате такого движения происходит также сдвиг некоторой его части в различных направлениях за счет отражения и скольжения по лопаткам, установленным под углом α к различным плоскостям их вращения (рис. 4, 5).

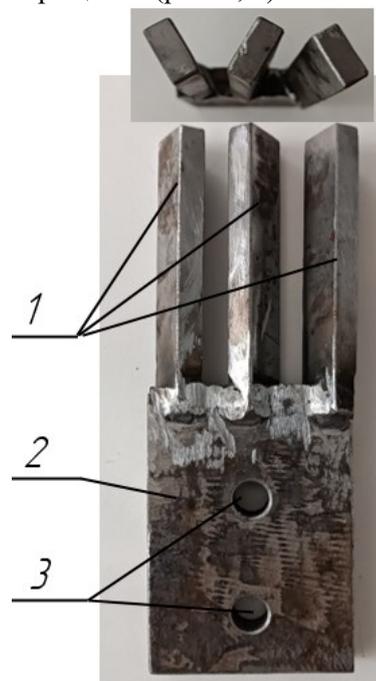


Рис. 4. Лопасть смесителя:

1 – лопатки; 2 – основание;

3 – отверстия для крепления к ротору

На рис. 5 представлена схема установки лопаток на лопасти и направление движение смеси. При таком расположении лопаток создается зазор b между ними, а встречно направленные потоки компонентов смеси F способствуют более быстрому её перемешиванию.

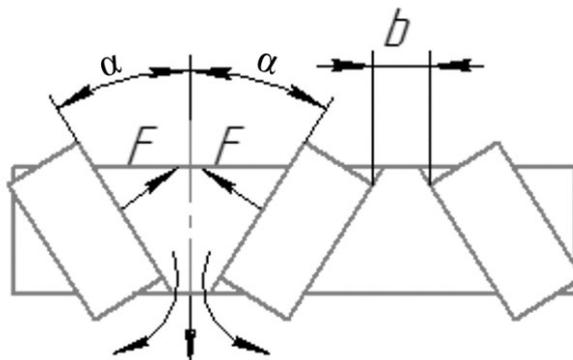


Рис. 5. Схема установки лопатки на лопасти и движение смеси

Создаваемые таким образом потоки частиц получают направленное движение, которое фактически и определяет характер и интенсивность процесса смешивания. Это движение сохраняется до тех пор, пока они контактируют с лопастями смесителя и нарушается при схождении материала с их рабочей поверхности. В дальнейшем оно повторяется при попадании сдвигаемой массы в зону действия следующей лопасти.

Поскольку скорость и направление потоков движущихся частиц посредственно влияют на интенсивность процесса смесеобразования и определяют характер изменения общего состояния исследуемой системы, то, зная законы движения этих потоков, можно управлять процессом смешивания, в частности – путем выбора оптимальных параметров рабочего органа и режимов работы смесителя.

Расположение на торце корпуса трех лопаток, размещенных под углом $\alpha = 45^\circ$ относительно продольной оси поперечного сечения корпуса, позволяет также создавать направленное встречное движение отраженного от соседней лопатки материала. Собравшийся перед лопатками перемешиваемый материал уплотняется и проходит в отверстие между ними, это приводит к резкому снятию напряжения и распылению его позади лопаток, что приведет к повышению качества приготовления сухих строительных смесей и сокращению времени перемешивания.

Однако, описание движения частиц в потоке задача весьма сложная. В практике очень часто установление и выбор конструктивных и кинематических параметров рабочих органов основываются на изучении законов движения отдельной частицы материального элемента по их рабочим поверхностям [14-15]. С этой целью рассматривают движение отдельной материальной частицы, находящейся в непосредственном контакте с рабочим органом смесителя, и считают,

что поведение остальных частиц движущегося потока в первом приближении аналогично движению данной частицы. Кроме того, считают, что частица, сходящая с лопасти, продолжает свое движение до полной остановки или столкновения в направлении вектора абсолютной скорости, которую она приобрела при движении по рабочей поверхности лопасти или столкновения с частицей, отразившейся от соседней лопатки.

Чтобы определить интересующую нас скорость движения частицы, необходимо, применительно к нашему случаю, решить обратную задачу динамики для отдельной несвободной материальной частицы, т.е. найти закон ее движения, зная действующие на нее силы, а также начальные и граничные условия её положения. Однако эта задача весьма сложная.

Очевидно, интенсивность и производительность процесса механического перемешивания, которое осуществляется путем взаимного перемещения минеральных частиц, зависит от скорости и числа оборотов лопаток, их размера, радиуса, формы, угла установки в плоскости вращения и по отношению друг к другу. На процесс перемешивания влияют также размеры корпуса смесителя, степень заполнения его смесью, последовательность и порядок подачи в смеситель составляющих смесь материалов и их физико-механические свойства.

Поэтому с целью установления рациональных параметров и подтверждения эффективности от применения разработанного смесителя было исследовано влияние угла наклона лопаток, окружной скорости их вращения и времени перемешивания на выходные параметры агрегата. Результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей на рис. 6 и 7.

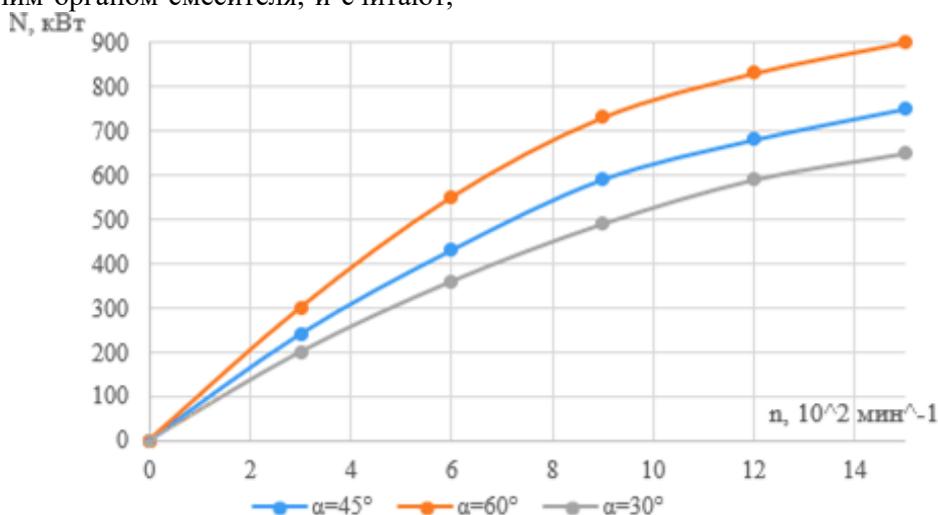


Рис. 6. Влияние угла наклона лопаток и частоты вращения роторов на потребляемую мощность

Отбор проб при приготовлении смесей в смесительной установке проводился через каждые 10 секунд после начала перемешивания смеси. Для испытаний отбиралась объединенная проба, составленная из трех-четырех тщательно перемешанных между собой точечных проб.

На рис. 6 представлен график зависимости влияния угла наклона лопаток и частоты вращения роторов на потребляемую мощность, анализ которого позволил установить, что увеличение угла наклона лопаток приводит к увеличению мощности, затрачиваемой на осуществление процесса перемешивания компонентов сухой строительной смеси. Это связано с тем, что увеличение угла наклона лопатки влечет за собой повышение сопротивления перемешиванию, так как возрастает площадь её лобового движения. Увеличение частоты вращения ротора влечет за собой пропорциональный рост мощности.

Однако важными показателями процесса приготовления смеси являются качество и время смешивания, которые в значительной степени влияют на производительность. Поэтому было изучено влияние угла наклона лопаток на продолжительность перемешивания для получения однородности смеси, равной 80 %.

На рис. 7 представлен график влияние угла наклона лопаток на продолжительность перемешивания, который позволил установить, что при угле наклона лопаток $\alpha = 45^\circ$ к направлению её движения достигается наилучший результат приготовления смеси. При изменении угла наклона лопатки от положения, равное 45° в ту или в другую сторону в диапазоне от 30° до 60° наблюдается ухудшение процесса перемешивания на что указывает увеличение времени, необходимого на получение готового продукта.

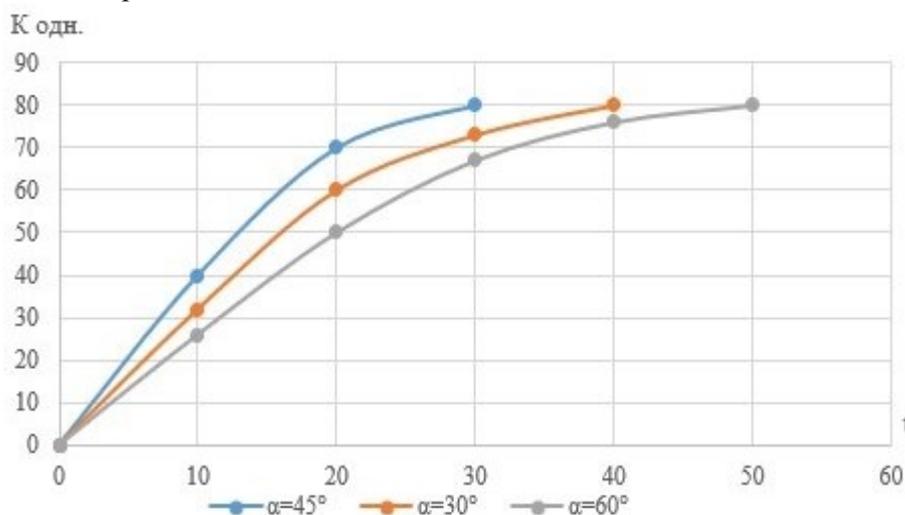


Рис. 7. Влияние угла наклона лопаток на продолжительность перемешивания

Это объясняется тем, что при угле 45° создаются условия перемешивания, при которых компоненты при движении с одной лопасти отбрасываются на противоположную и далее направляются в зазор между ними, пройдя через который, смесь распыляется так как расположение лопастей представляет собой диффузор. Такое движение компонентов смеси приводит к более быстрому их перемешиванию и тем самым позволяет уменьшить время приготовления сухой строительной смеси на 15–20 %.

Вывод. Разработанная экспериментальная установка позволяет интенсифицировать процесс движения компонентов смеси, и тем самым уменьшить время на их перемешивания. Это достигается за счет конструкции лопастей смесителя, представляющих собой жестко установленные на основании три лопатки, причем первая из них повернута на угол 45° относительно продольной оси основания, а следующие лопатки

повернуты друг относительно друга на угол $\alpha = 90^\circ$. Такое расположение лопаток позволяет создавать как меньшее сопротивление их движению, за счет уменьшения площади лобовой атаки, по сравнению с плоскими лопатками, так и сложное движение частиц смешиваемых компонентов, что уменьшает время, необходимое на перемешивание компонентов.

В результате проведения экспериментальных исследований изучено влияние конструктивно-технологических параметров смесителя: угла наклона лопаток, окружной скорости их вращения и времени перемешивания на качественные характеристики процесса смешивания сухих строительных смесей. Установлено, что увеличение угла наклона лопаток приводит к повышению мощности, затрачиваемой на осуществление процесса перемешивания компонентов. Это связано с тем, что при увеличении угла наклона лопатки сопровождается повышением

сопротивления перемешиванию, так как возрастает площадь её соприкосновения со смесью. Увеличение частоты вращения роторов влечет за собой пропорциональный рост мощности. При угле наклона лопаток равном 45° к направлению их движения достигается наилучший результат приготовления смеси.

Применение, разработанного смесителя в технологических линиях по производству сухих строительных смесей позволит значительно повысить производительность, а компактная его конструкция способствует размещению на небольших производственных площадях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ рынка сухих строительных смесей в России в 2018–2022 гг., прогноз на 2023–2027 годы в условиях санкций. URL: <http://info@businessstat.ru>, свободный (дата обращения: 07.02.2024).
2. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Глагоев Е.С., Володченко А.А., Воронов В.В., Кучерова А.С., Теоретические основы создания сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №9. С. 40–51.
3. Турбулентные смесители серии «СБТ» URL: <https://www.penostroy.ru/equip/8.html>, свободный (дата обращения: 07.02.2024).
4. Satecmix. URL: http://www.satecmix.ru/tech_3.html, свободный (дата обращения: 07.02.2024).
5. Romanovich A.A., Osalou A.Z., Mamatova V.V., Pahomov E.G. The grinding bodies movement dynamics study in a ball mill equipped with energy-exchanging devices // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 698. 066037. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066037
6. Несмеянов Н.П., Бражник Ю.В., Барышева Т.А. Разработка роторного смесителя с высокоскоростным режимом смешивания для производства модифицированных строительных смесей // Научно-технологические инновации : Юбилейная международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, XXI научные чтения. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. Том 4. С. 85–87.
7. Романович А.А., Пахомов Е.Г. и др. Энергосбережение при измельчении материалов с анизотропной текстурой // Строительные и дорожные машины // СДМ-Пресс. 2020. №11. С. 9–16.
8. Romanovich A.A., Amini E., Apukhtina I.V., Pahomov E.G. The grinding clinker pressure process study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 698. 066038. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066038
9. Пат. 214623 Российская Федерация, МПК B01F 15/00 (2006.01); B01F 7/00 (2006.01). Лопатка смесителя / Е.Г. Пахомов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им В.Г. Шухова. №2022105098; заявл. 25.02.22; опубл. 08.11.22.
10. Вэй П.А. Имитационное моделирование параметров процесса смешивания сухих строительных смесей в горизонтальном барабанном смесителе непрерывного действия // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. № 1-1(8). С. 122–128. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-1-13.
11. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 121–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127
12. Кудрявцев В.А., Левина Н.С., Светлов С.А. Исследование процесса перемешивания компонентов смесевых составов в лопастном смесителе // Ползуновский вестник. 2009. № 3. С. 141–143.
13. Казичев И.Н. Обоснование конструкции смесителя для производства кускового топлива из фрезерного торфяного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 4. С. 245–247.
14. Остриков А.Н., Сухарев А.И. Разработка математической модели процесса смешивания в двухвальном лопастном смесителе // Хранение и переработка сельхозсырья. 2002. № 5. С. 26–29.
15. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Гончаров Е.И. Аэродинамические особенности пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 11. С. 149–155. DOI: 10.12737/article_5a001abe2036c3.69884344.

Информация об авторах

Пахомов Евгений Григорьевич, младший научный сотрудник, аспирант. E-mail: evgniur@mail.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.

Романович Марина Алексеевна, доцент, кандидат экономических наук кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: bel31rm@yandex.ru., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дядим Максим Олегович, младший научный сотрудник, аспирант. E-mail: Dyadin_maks@mail.ru Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 01.02.2024 г.

© Пахомов Е.Г., Романович А.А., Романович М.А., Дядин М.О., 2024

***Pakhomov E.G., Romanovich A.A., Romanovich M.A., Yadin M.O.**

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: evgniyo@mail.ru*

ENERGY-SAVING MIXING UNIT FOR THE PREPARATION OF DRY BUILDING MIXES

Abstract. *The article describes an experimental installation of an energy-saving mixing unit for the preparation of dry building mixes. The installation consists of a receiving device for loading various components, a mixing chamber, which includes two shafts with blades that allow to intensify the process of movement of the components of the mixture, and thereby reduce the time for mixing them. The shafts are driven by two electric motors, a valve is provided for unloading the finished mixture, installed in the lower part of the mixing chamber, which is controlled by a pneumatic system for quick operation. The article presents the results of experimental studies to establish the influence of the structural and technological parameters of the mixer: the angle of inclination of the blades, the circumferential speed of their rotation and the mixing time on the qualitative characteristics of the mixing process of dry building mixes. It was found that an increase in the angle of inclination of the blades leads to an increase in the power spent on the mixing process of the components. This is due to the fact that with an increase in the angle of inclination of the blade, it is accompanied by an increase in the resistance to mixing, as the area of its contact with the mixture increases. An increase in the rotation frequency of the rotors entails a proportional increase in power. With an angle of inclination of the blades equal to 45 ° to the direction of its movement, the best result of preparing the mixture is achieved.*

Keywords: *energy-saving mixing unit, blade, dry construction mix.*

REFERENCES

1. Analysis of the dry building mixes market in Russia in 2018-2022, forecast for 2023-2027 under sanctions. URL: <http://info@businessstat.ru> , free (accessed 07.02.2024).

2. Zagorodnyuk L.H., Lesovik V.S., Glagoev E.S., Volodchenko A.A., Voronov V.V., Kucherova A.S., Theoretical foundations of the creation of dry building mixes [Teoreticheskie osnovy sozdaniya suhikh stroitel'nyh smesey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 9. Pp. 40–51. (rus)

3. Turbulent mixers of the SBT series. URL: <https://www.penostroy.ru/equip/8.html> , free (accessed 07.02.2024).

4. Satecmix. URL: http://www.satecmix.ru/tech_3.html , free (accessed 07.02.2024).

5. Romanovich A.A., Osalou A.Z, Mamatova V.V., Pahomov E.G. The grinding bodies movement dynamics study in a ball mill equipped with energy-exchanging devices. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698. 066037. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066037

6. Nesmeyanov N.P., Brazhnikyu V., Barysheva T.A. Development of a rotary mixer with a high-

speed mixing mode for the production of modified building mixes [Razrabotka rotornogo smesitelya s vysokoskorostnym rezhimom smeshivaniya dlya proizvodstva modifitsirovannyh stroitel'nyh smesey] Naukoemkie tekhnologii innovacii : Yubilejnaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya 60-letiyu BGTU im. V.G. Shuhova, XXI nauchnye chteniya. Belgorod: BSTU named after V.G. Shuhov. 2014. Vol. 4 Pp. 85–87. (rus)

7. Romanovich A.A., Pakhomov E.G. and others. Energy saving when grinding materials with anisotropic texture [Energoberezhnie pri izmel'chenii materialov s anizotropnoj teksturoj]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. SDM-Press. 2020. No. 11. Pp. 9–16. (rus)

8. Romanovich A.A., Amini E., Pahomov E.G. The grinding clinker pressure process study. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698. 066038. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066038

9. Pakhomov E.G. Lopatka smesitelya. Patent RF, no. 2022105098, 2022.

10. Wei P.A. Simulation modeling of the parameters of the mixing process of dry building mixes in

a horizontal continuous drum mixer [Imitacionnoe modelirovanie parametrov processa smeshivaniya suhikh stroitel'nyh smesey v gorizontal'nom barabannom smesitele nepreryvnogo dejstviya]. Avtomatizaciya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemah. 2014. № 1-1(8). Pp. 122–128. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-1-13. (rus)

11. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended layer with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers [Mekhanika vzveshennogo sloya s polidispersnymi chasticami v pnevmosmesiteleyah nepreryvnogo dejstviya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 121–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127 (rus)

12. Kudryavtsev V.A., Levina N.S., Svetlov S.A. Investigation of the mixing process of components of mixed compositions in a paddle mixer [Issledovanie processa peremeshivaniya komponentov smesevykh sostavov v lopastnom smesitele]. Polzunovskiy vestnik. 2009. No. 3. Pp. 141–143. (rus)

13. Kazichev I.N. Substantiation of the mixer design for the production of lump fuel from milling peat raw materials [Obosnovanie konstrukcii smesitelya dlya proizvodstva kuskovogo topliva iz frezernogo torfyanogo syr'ya]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2012. No. 4. Pp. 245–247. (rus)

14. Ostrikov A.N., Sukharev A.I. Development of a mathematical model of the mixing process in a two-shaft paddle mixer [Razrabotka matematicheskoy modeli processa smeshivaniya v dvuhval'nom lopastnom smesitele]. Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya. 2002. No. 5. Pp. 26–29. (rus)

15. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Goncharov E.I. Aerodynamic features of pneumatic mixers for the production of dry building mixes [Aerodinamicheskie osobennosti pnevmosmesitelej dlya proizvodstva suhikh stroitel'nyh smesey]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 11. Pp. 149–155. DOI: 10.12737/article_5a001abe2036c3.69884344. (rus)

Information about the authors

Pakhomov, Evgeny G. Postgraduate student. E-mail: evgniyp@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. 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.

Romanovich, Marina A. PhD, Assistant professor. E-mail: bel31rm@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dadin, Maxim O. Postgraduate student. E-mail: Dyadin_maks@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 01.02.2024

Для цитирования:

Пахомов Е.Г., Романович А.А., Романович М.А., Дядин М.О. Энергосберегающий смеситель для приготовления сухих строительных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №3. С. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-107-115

For citation:

Pakhomov E.G., Romanovich A.A., Romanovich M.A., Yadin M.O. Energy-saving mixing unit for the preparation of dry building mixes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 3. Pp. 107–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-3-107-115