

Научно-теоретический журнал

ВЕСТНИК

БГТУ им. В.Г. Шухова

ISSN 2071-7318

11

2020

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

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

№ 11, 2020 год

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

Vol. 11. 2020

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:

- 05.23.01** – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
- 05.23.03** – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
- 05.23.05** – Строительные материалы и изделия (технические науки)
- 05.23.20** – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура)
- 05.23.21** – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)
- 05.23.22** – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)
- 05.23.22** – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура)
- 05.17.06** – Технология и переработка полимеров и композитов (технические науки)
- 05.17.11** – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)
- 05.02.05** – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки)
- 05.02.07** – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 05.02.08** – Технология машиностроения (технические науки)
- 05.02.13** – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (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).

Официальный сайт журнала: <https://bulletinbstu.editorum.ru>

Тел: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 44446.

Online подписка: <http://www.akc.ru/itm/255810462/>

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:

- 05.23.01** – Building structures, constructions and facilities (technical sciences)
- 05.23.03** – Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences)
- 05.23.05** – Building materials and products (technical sciences)
- 05.23.20** – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture)
- 05.23.21** – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (technical sciences)
- 05.23.22** – Urban planning, rural settlement planning (architecture)
- 05.17.06** – Technology and processing of polymers and composites (technical sciences)
- 05.17.11** – Technology of silicate and refractory nonmetallic materials (technical sciences)
- 05.02.05** – Robots, mechatronics and robotic systems (technical sciences)
- 05.02.07** – Technology and equipment of mechanical and physical-technical processing (technical sciences)
- 05.02.08** – Engineering technology (technical sciences)
- 05.02.13** – Machines, units and processes (branch-wise) (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).

Official website of the journal: <https://bulletinbstu.editorum.ru>
Tel.: +7 (4722) 30-99-77. E-mail: VESTNIK@intbel.ru
Subscription index in the united catalogue of "Press of Russia" – 44446.
Online subscription: <http://www.akc.ru/itm/2558104627/>

Главный редактор

Евтушенко Евгений Иванович, д-р техн. наук, проф., первый проректор, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики 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, член-корр. РААСН, д-р арх., проф., заведующий кафедрой градостроительства Самарского государственного технического университета, Архитектурно-строительной академии (РФ, г. Самара).

Баженов Юрий Михайлович, академик РААСН наук, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии вяжущих веществ и бетона НИУ Московского государственного строительного университета (РФ, г. Москва).

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).

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

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).

Гридчин Анатолий Митрофанович, д-р техн. наук, проф., Президент Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Давидюк Алексей Николаевич, д-р техн. наук, директор НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (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).

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

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

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

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., директор института химических технологий, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

Павлович Ненад, PhD, проректор по научной работе и издательской деятельности, проф. Машиностроительного факультета Государственного Нишского университета (Республика Сербия, г. Ниш).

Перькова Маргарита Викторовна, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (РФ, г. Белгород).

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

Потапов Евгений Эдуардович, д-р хим. наук, проф. МИРЭА – Российского технологического университета (РФ, г. Москва).

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).

Семенов Сергей Владимирович, д-р арх., проф., заведующий кафедрой архитектурного и градостроительного наследия 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).

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).

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

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

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

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

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

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

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY OF CHIEF EDITOR

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

MEMBER OF EDITORIAL BOARD

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

Elena A. Akhmedova, Corresponding member 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).

Yuriy M. Bazhenov, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Russian Federation, Moscow).

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

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

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).

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

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

Anatoliy M. Gridchin, Doctor of Technical Sciences, Professor, President, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Russian Federation, Belgorod).

Aleksey N. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Director NII ZHB named after A.A. Gvozdeva AO «NIC «Stroitel'stvo» (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).

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).

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, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (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).

Evgeniy E. Potapov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University (Russian Federation, Moscow).

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).

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).

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).

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

Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩИХ ИЗ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ	8
Ястремский Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ МЕТОДАМИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА	24
Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Ахмед А.А.А., Лесовик Г.А. ПЕРЕРАБОТАННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ОТХОД КАК БЕТОННЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ УСТОЙЧИВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	32
Блажнов А.А. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЛОЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ ПОСТРОЕЧНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ФОРМ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ	41
Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ И ВЕЛИЧИНЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ	48
Потапова А.Ю., Белолюбская С.В., Егорова А.Д. ИСТОРИЯ ГРАДО-ЯКУТСКОГО КАФЕДРАЛЬНОГО ТРОИЦКОГО СОБОРА В КЕРАМИЧЕСКОМ КИРПИЧЕ	57
Шувалов В.М. ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ РЕКРЕАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ В БАНГЛАДЕШ	66

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ВСПУЧЕННОГО ПЕРЛИТОВОГО ПЕСКА	75
Кочергин Ю.С., Носова А.Н., Кравчук Т.Н., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ОТВЕРЖДЕННЫХ КОМПЛЕКСОМ ОЛОВООРГАНИЧЕСКОГО ГАЛОГЕНИДА С АМИНОФЕНОЛЬНЫМ ОТВЕРДИТЕЛЕМ	89
Евтушенко Е.И., Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Старостина И.В., Кожухова М.И. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ОТСЕВА ГРАНИТА В МЕЛЬНИЦАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО	102

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А. РАЗРАБОТКА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	113
Семикопенко И.А., Воронов В.П., Беляев Д.А., Бороздин Е.А. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ	125

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhuhova N.I., Titenko A.A. PRODUCTION METHODS OF BINDERS CONTAINING GYPSUM-BEARING WASTES: A REVIEW	8
Yastremskiy D.A. RESEARCH OF BITUMINOUS BINDER WITH STABILIZING ADDITIVES BY INFRARED SPECTROSCOPY AND X-RAY SPECTRAL ANALYSIS	24
AlboAli W.S., Lesovik R.V., Sopin D.M., Ahmed A.A.A. RECYCLED CONSTRUCTION WASTE AS A CONCRETE AGGREGATE FOR SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS	32
Blazhnov A.A. RATIONAL PARAMETERS OF A MULTI-SPAN GREENHOUSE OF BUILDING PRODUCTION FOR SMALL FORMS OF MANAGEMENT	41
Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. ESTIMATION OF THERMAL INSULATION THICKNESS AND DEPTH OF UNDERGROUND POLYETHYLENE HEAT SUPPLY PIPELINES IN REGIONS WITH PERMAFROST	48
Potapova A.Yu., Belolyubskaya S.V., Egorova A.D. HISTORY OF HOLY TRINITY CATHEDRAL (YAKUTSK) IN CERAMIC BRICK	57
Shuvalov V.M. TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN ARCHITECTURE OF RECREATIONAL FACILITIES IN BANGLADESH	66

CHEMICAL TECHNOLOGY

Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D. FEATURES OF THE PROCESSES OF HYDRATION OF BINDING COMPOSITIONS USING WASTE OF EXPANDED PERLITE SAND	75
Kochergin Y.S., Nosova A.N., Kravchuk T.N., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES CURED BY A COMPLEX OF ORGANIC TIN HALIDE WITH AN AMINOPHENOL HARDENER	89
Evtushenko E.I., Cherevatova A.V., Kozhukhova N.I., Osadchaya M.S., Starostina I.V., Kozhukhova M.I. STUDY OF MECHANOACTIVATION EFFECTIVENESS OF GRANITE SCREENING IN MILLS OF VARIOUS TYPES WHEN SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED BINDER	102

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

Erygin E.V., Dujun T.A. DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORKS FOR FORECASTING ROUGHNESS WHEN MILLING VARIOUS MATERIALS	113
Semikopenko I.A., Voronov V.P., Belyaev D.A., Borozdin E.A. THEORETICAL STUDY OF THE MATERIAL GRINDING PROCESS IN THE WORKING CHAMBER OF A DISK MILL	125

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23

¹Алфимова Н.И., ¹Пириева С.Ю., ¹Елистраткин М.Ю., ¹Кожухова Н.И., ²Титенко А.А.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова³ООО «Инжиниринговый центр БелГУ»

*E-mail: alfimovan@mail.ru

ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩИХ ИЗ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Аннотация. Большой объем научных публикаций и аналитических материалов, посвященных проблеме гипсосодержащих отходов (ГСО), создаёт понимание её огромных масштабов для многих государств, назревшей необходимости поиска решений, но также и возможностей, открывающихся при разработке и внедрении эффективных технологий утилизации ГСО в разных сферах строительной отрасли. В данной статье проведён анализ актуальных технологических подходов к переработке ГСО в рамках основного из возможных направлений утилизации – получения гипсовых вяжущих. В частности, установлено, что применительно к гипсосодержащим отходам использование традиционных технологий по синтезу вяжущих из природного сырья, в большинстве случаев не является приемлемым ввиду непостоянства их вещественного состава, содержания большого количества примесей и высокой дисперсности. По этой причине, наиболее прогрессивные из предложенных различными исследователями технологий предусматривают мероприятия по коррекции указанных недостатков сырья, либо предполагают синтез целевого продукта (высококачественного гипсового вяжущего) основанный на иных принципах – выращивание кристаллов благоприятной геометрии и свойств в солевых и кислотных растворах. Данные методы отличаются повышенной сложностью, вредностью для оборудования и персонала, ведут к образованию вторичных отходов, что снижает привлекательность их внедрения в широкую практику. Синтез вяжущих из ГСО методом прокаливания является технологически и организационно наиболее простым, однако сами вяжущие отличаются невысокими физико-механическими показателями. Важным ресурсом повышения их рентабельности и инвестиционной привлекательности представляется возможность обеспечения комплексной переработки сырья с получением на выходе не только вяжущих, но и других кондиционных продуктов, при минимальном образовании вторичных отходов. Создание такой технологии переработки ГСО и ее реализация в промышленных масштабах позволит существенно увеличить объемы перерабатываемых гипсосодержащих отходов, решить не только экологические вопросы, но и расширять сырьевую базу регионов, где остро стоят данные вопросы.

Ключевые слова: гипсосодержащие отходы, фосфогипс, борогипс, цитрогипс, α-полугидрат гипса, β-полугидрат гипса, автоклавная обработка, химические растворы.

Введение. Утилизация гипсосодержащих отходов (ГСО) различных промышленных производств является актуальной проблемой для многих регионов по всему миру. Существует большое количество доказанных научно и апробированных практически направлений утилизации ГСО [1], в частности, в цементной промышленности (компонент сырьевой смеси [2, 3] регулятор сроков схватывания [4–6]); дорожном строительстве (материал насыпи [7], компонент смеси для дорожного покрытия [8], модификатор битума [9]); при производстве строительных материалов (пенобетон [10], газобетон [11], серно-полимерный бетон [12], отделочная плитка [13, 14], штукатурные [15, 16] и тампонажные растворы [17] и др.); керамические материалы (плитка [18], кирпич [19], керамзит [20]) вяжущие вещества (α-

β- полугидрат кальция [21, 22 и др.], композиционные вяжущие гидратационного твердения [23–25], щелочеактивированные вяжущие [26, 27]).

Однако несмотря на такой большой объем изысканий различных научных групп по всему миру и опробованных возможных направлений утилизации, лишь порядка 15 % данного сырья перерабатывается, остальное по-прежнему накапливается в отвалах и шламбассейнах, приводя к отчуждению значительных территорий и нанося вред экологической обстановке регионов [1]. Организация производства вяжущих из ГСО в промышленных объемах позволила бы существенно повысить процент утилизации данного сырья, а также расширить минерально-сырьевую базу ряда регионов.

Применение стандартных технологий, используемых при переработке природного гипсового камня, в случае использования ГСО, как

правило не является эффективным. Это обусловлено рядом особенностей отходов: во-первых, нестабильностью вещественного состава и наличием большого количества примесей, что требует поиска способов их очистки или внесения изменений в технологический режим; во-вторых, высокой дисперсностью сырья, которая отражается на качестве конечного продукта, что также требует разработки дополнительных мероприятий по решению данной проблемы [28–30 и др.]. Все это затрудняет разработку единого алгоритма и технологии получения высококачественных вяжущих на основе ГСО.

Связи с вышеизложенным, целью работы явился анализ возможных способов и подробное рассмотрение технологических переделов при производстве вяжущих из гипсосодержащих отходов различных производств, выявление их достоинств и недостатков и возможности использования данных способов для организации рентабельной технологии производства гипсовых вяжущих в промышленных объемах.

Методология. Литературный обзор проводился путем обработки, анализа и общения данных из открытых первоисточников, представленных на портале Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU; коллекции классических полнотекстовых журналов издательства Elsevier на платформе ScienceDirect; поисковой системы Google Scholar.

Основная часть.

Способы синтеза гипсовых вяжущих

Анализ литературных источников показал, что в Китае, занимающем первое место по объемам добычи фосфатов [31] в качестве способа синтеза α -полугидрата из фосфогипса чаще всего рассматривается метод солевых растворов. Данный способ отличается большим количеством вариаций применяемых модификаторов, влияющих на скорость и морфологию образующихся кристаллов, и большая часть исследований направлена на оптимизацию процесса синтеза именно с этой позиции. Для данного способа характерны многостадийность, четкий пооперационный контроль и потребность в большом количестве химических реагентов.

Так авторами [21], рассмотрена возможность получения α -полугидрата в растворе Na_2SO_4 под атмосферным давлением, а также исследовать влияние малеиновой кислоты, выступающей в качестве модификатора, на скорость дегидратации и морфологию кристаллов. В качестве объектов исследования выступал фосфогипс, полученный на заводе по производству фосфатных удобрений в провинции Гуйчжоу, Китай; сульфат натрия аналитического качества (Na_2SO_4), оксид кальция (CaO) и малеиновая кислота ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$)

производства Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd., Шанхай, Китай. Эксперименты проводились в растворе Na_2SO_4 при разных температурах (85, 90, 95 и 97 °C) и молярных концентрациях. Сначала 1,5 л раствора Na_2SO_4 (0,35; 0,70; 1,06 и 1,41 М) и малеиновой кислоты (0,00, 1,44, 2,88, 4,32 и 5,76 мМ) предварительно разогревались на масляной бане после чего вводилось 500 г фосфогипса. По достижению заданной температуры, осуществлялось перемешивание суспензии со скоростью 200 об/мин. Во время реакции дегидратации производился отбор горячей суспензии через определенные промежутки времени и осуществлялась фильтрация. Полученный фильтрат трижды промывали кипящей водой и дважды чистым этанолом, перед 2-х часовой сушкой в сушильном шкафу при температуре 60 °C. Анализируя полученные результаты авторы сделали выводы, что Na_2SO_4 обладает хорошей обезвоживающей способностью, при этом время дегидратации сокращается с ростом концентрации и температуры раствора сульфата натрия. Был выявлен ингибирующий эффект малеиновой кислоты. При ее отсутствии в системе α -полугидрат представлен столбчатыми кристаллами с доминирующими кристаллическими плоскостями (4 0 0) и (2 0 0). Увеличение концентрации $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ в системе приводит к уменьшению кристаллов в длину и росту их в ширину, с преимущественными кристаллическими плоскостями (2 0 4). Также выявлено, что кристаллическая плоскость (1 1 1) является наиболее стабильной для α -полугидрата.

В работе [32] исследовалась возможность получения α -полугидрата из фосфогипса (Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd., Шанхай, Китай) в растворе CaCl_2 , при этом качестве кристаллического модификатора для регулирования морфологии полугидрата была рассмотрена L-аспарагиновая кислота (L-Asp).

Процесс дегидратации осуществлялся в 1,5 л раствора CaCl_2 (2,97 М) при 95 °C, концентрация L-Asp составила – 0,00; 0,63; 1,25; 1,88; 2,50 мМ. Приготовление суспензии, отбор проб осуществлялся аналогично, описанным в работе [21]. На основании полученных результатов авторы делают вывод об эффективности L-Asp как кристаллического модификатора. В частности, с увеличением концентрации L-Asp от 0,00 до 2,50 мМ, полугидрат становится преимущественно представлен кристаллами, укороченными в длину и увеличенными в ширину, соотношение сторон уменьшается с 5,74 до 1,21, при этом средняя ширина увеличивается с 11,04 до 27,63 мкм, что, по мнению авторов, способствует росту соотношения прочность на изгиб/сжатие от $(6,2 \pm 0,6) / (13,1 \pm 1,1)$ МПа до $(10,7 \pm 0,7) / (30,2 \pm 1,4)$ МПа соответственно. Так же авторы отмечают,

что гипсовый камень из вяжущего полученного с добавлением 2,50 мМ L-Asp отличается большей плотностью и однородностью новообразований по морфологии сравнении с гипсовым камнем из немодифицированного вяжущего.

Использованию CaCl_2 в качестве среды для получения вяжущего из фосфогипса также посвящена работа [33]. В частности, авторами рассмотрена возможность многократного повторного использования раствора CaCl_2 при изготовлении вяжущих и влияние рециркуляции на качество конечного продукта. В качестве объектов исследования использовался фосфогипс Hubei Yihua Fertiliser Co., Ltd (город Ичан, Китай), раствор CaCl_2 (24 мас. %), в качестве модификатора для контроля морфологии кристаллов применялся сукцинат натрия.

Вяжущее изготавливали путем смешения 500 г фосфогипса с 1000 г раствора CaCl_2 (24 мас. %) трехгорлой колбе (2000 мл). Скорость перемешивания составляла 60 ± 5 об/мин, температура протекания реакции – 97 ± 1 °C, одновременно в систему вводился модификатор в нужной концентрации. Через определенные временные интервалы (10, 20, 30, 60, 120, 150 мин) осуществлялся отбор суспензии в количестве 5 мл с целью контроля процесса дегидратации. После завершения процесса производилось отделение твердой фазы от жидкой, полученное вяжущее промывалось и отправлялось на сушку при температуре 80 °C с последующим контролем морфологии новообразований и свойств. Отфильтрованный раствор возвращался в процесс производства, его потери компенсировались новым раствором аналогичной концентрации. Процесс рециркуляции повторялся несколько раз.

Авторами было установлено, что увеличение циклов рециркуляции раствора до 6 раз способствует росту соотношения параметров кристаллов длина/диаметр от 0,9 до 7,6. При этом 2-х часовая прочность на изгиб и 3-х дневная прочность на сжатие образцов, в сравнении с контрольными, полученными по автоклавной технологии, снизилась от $4,7 \pm 0,2$ МПа до $1,6 \pm 0,2$ МПа и от $37,6 \pm 0,4$ МПа до $5,6 \pm 0,2$ МПа соответственно. Однако контроль концентрации модификатора, вводимого после каждого цикла переработки способствовал образованию кристаллов со средним значением отношения длина/диаметр близким к 1, при этом наблюдалась убывающая тенденция данного параметра от цикла к циклу. Прочность при изгибе образцов в возрасте 2 ч составила от $4,2 \pm 0,3$ МПа до $5,1 \pm 0,1$ МПа, в возрасте прочность при сжатии в возрасте 3-х дней лежала в диапазоне от $27,3 \pm 0,5$ МПа до $41,2 \pm 0,1$, что соответствует требованиям стандарта JC/T 2038-2010. Таким образом, авторы

приходят к общему выводу, что при определенных параметрах технологического процесса и его контроля, повторное многократное использование раствора CaCl_2 (до 6 раз) является вполне приемлемым для получения, вяжущего, соответствующего требованиям стандарта.

Работа [34] также направлена на изучение синтеза α -полугидрата из фосфогипса в растворе CaCl_2 . При этом авторами рассмотрена возможность повышения качества конечного продукта за счет предварительной очистки фосфогипса (Hubei Yihua Fertiliser Co., Ltd, Китай) с применением « $\text{HCl-H}_2\text{SO}_4$ метода». Процесс синтеза вяжущего аналогичен ранее описанным (синтез, промывка и сушка). Анализ полученных результатов показал, что, не смотря на более продолжительный цикл синтеза, вяжущее, полученное из очищенного фосфогипса, в сравнении с контрольным из неочищенного, содержит значительно меньшее количество примесей, отличается большей белизной и показателями прочности на изгиб в возрасте 2 ч на 18 %, прочности на изгиб и сжатие в возрасте 3-х дней на 20 и 33 % соответственно.

Коллектив авторов Кафедры инженерной экологии (Университет Чжэцзян, Ханчжоу, Китай) в своих работах [35–37] рассмотрел возможность получения α -полугидрата из гипса, образующегося в результате десульфуризации дымовых газов (FGD-гипс).

Так, в частности, в работе [35] эксперимент проводился с использованием лабораторного оборудования. В качестве дегидратационной среды выступала смесь CaCl_2 (3,0 М), MgCl_2 , (1,0 М), а также KCl , концентрация которого варьировалась от 0 до 0,263 М. Дегидратация суспензии, полученной путем смешения 1 л предварительно нагретого солевого раствора и 324 г FGD-гипса осуществлялась в специальном стеклянном реакторе при температуре 95 °C ($\pm 0,3$ °C). Твердые образцы 4 раза промывались кипящей деионизированной водой и один раз уксусом, после чего осуществлялась сушка при температуре 60 °C в течение 2 ч. Комплексное исследование полученного вяжущего позволило установить, что скорость дегидратации увеличивалась, когда концентрация ионов K^+ был на низком уровне (например, менее 0,035 М), в тоже время увеличение концентрации ионов K^+ сильно замедляет зарождение и рост кристалла α -полугидрата и вызвал осаждение ангидрита. При этом ионы K^+ за счет своей адсорбции на границах кристаллов, положительно влияют на их морфологию.

В работе [36] авторы приводят данные по изучению морфологии кристаллов вяжущего, полученного из FGD-гипса (Электростанция

Hangzhou Banshan, Китай) в 1 л раствора электролита содержащего 30,0 мас. % CaCl_2 ; 2,0 мас. % MgCl_2 ; 0,50 мас. % KCl и определенное количество добавок тартрата калия-натрия ($1,0 \cdot 10^{-4}$; $1,0 \cdot 10^{-3}$; $1,0 \cdot 10^{-2}$ и $2,5 \cdot 10^{-2}$ М) или цитрата натрия ($1,0 \cdot 10^{-5}$; $2,0 \cdot 10^{-5}$ и $1,0 \cdot 10^{-4}$ М). Последовательность процесса, температурный режим и способы последующей обработки вяжущего были аналогичны описанным в работе [35]. На основании проведенных исследований авторы делают вывод о возможности получения α -полугидрата из FGD-гипса в растворе Ca-Mg-K-Cl без добавок при 95 °С и атмосферном давлении. Добавки тартрата калия-натрия и цитрата натрия при низкой концентрации оказывают значительное влияние на скорость дегидратации и морфологию кристаллов. В частности, введение тартрата калия-натрия ($1,0 \cdot 10^{-2}$ – $2,5 \cdot 10^{-2}$ М) уменьшает скорость обезвоживания и увеличивает у кристаллов соотношение длина/ширина, что неблагоприятно сказывается на прочности конечного продукта. В тоже время введение цитрата натрия ($1,0 \cdot 10^{-5}$ – $2,0 \cdot 10^{-5}$ М) незначительно увеличивает скорость обезвоживания и уменьшает отношение длина/ширина кристаллов, что благоприятно отражается на прочностных характеристиках вяжущего.

В работе [37], была рассмотрена возможность получения вяжущего из FGD-гипса (завод Xiaoshan Power, провинция Чжэцзян, Китай). Эксперимент проводился на пилотной установке, процесс производства состоял из нескольких этапов: 1 – приготовление солевого раствора из трех видов солей (25 мас.% CaCl_2 , 2,0 мас.% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и 1,0 мас.% KCl); 2 – введение FGD-гипса в раствор и воды с целью получения 15–25 мас.% гипсовой суспензии; 3 – обработка паром с давлением 0,8 МПа и температурой 250 °С в специальной установке, с последующим поддержанием постоянной температуры 94 °С (± 2 °С); 4 – введение модификаторов $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$; 5 – отбор проб для промежуточного контроля до подтверждения факта получения α -полугидрата; 6 – перемещение продукта в циклон с целью разделения путем промывки и фильтрации. Далее солевой раствор возвращался в процесс производства, а вяжущее направлялось на сушку. Общая длительность процесса составляла 5–6 часов. 2-х часовая прочность на изгиб полученного вяжущего составляла 6,8–7,3 МПа, предел прочности при сжатии 12,2–23,3 МПа, в сухом состоянии – 29,6–37,9 МПа.

В работе [38] также рассмотрена возможность получения α -полугидрата из FGD гипса (Электростанция в провинции Чжэцзян, Китай) в солевом растворе 4,0 М $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и K_2SO_4 (0, 8,75, 17,50, 43,75, 87,50 mM) при температуре

95 °С и атмосферном давлении. Авторами было установлено, что при концентрации K_2SO_4 – 8,75 mM фазовый переход заканчивается за 6,7 ч, а вяжущее на 98,23 % представлено α -полугидратом, при этом двухчасовая прочность на сжатие составила – 17,2 МПа, на изгиб – 5,9 МПа, аналогичные показатели в возрасте 3-х дней составили 37,4 МПа на сжатие и 11,2 МПа на изгиб. Также авторы отмечают снижение риска коррозии в сравнении с вяжущими полученными в хлоридной системе ($\text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 + \text{KCl}$).

Возможность синтеза, вяжущего в условиях повышенного атмосферного давления и температуры, была также рассмотрена в работе [39]. Вяжущее было получено из фосфогипса, образовавшегося при производстве фосфорной кислоты (заводе города Сяньфань Провинция Хубэй) путем обработки паром низкого давления – 0,12 МПа, 120 °С в течение 16 ч и при более высоком давлении пара – 0,8 МПа, температуре – 180 °С в течение 8 часов. После автоклавной обработки образцы 24 часа выдерживались в этаноле. Анализ полученных вяжущих показал, что при использовании первого режима кристаллическая фаза в основном превратилась из двугидрата в полугидрат, в то время как использование второго режима способствовало полной дегидратации с переходом двухводного гипса в ангидрит.

Авторами работы [40] был предложен состав многокомпонентного вяжущего полученного путем смешения гидратированной извести, летучей золы, гранулированного доменного шлака, мраморной пыли и химических добавок с α -гипсом. Получение α -полугидрата осуществлялось в две стадии: на первой – производилась очистка фосфогипса (M/s Rashtriya Chemicals & Fertilizers, Mumbai) на экспериментальной установке (Центральный научно-исследовательский институт зданий, Рурки). Процесс очистки заключался в растворении примесей путем смешения с водой, мокром просеивании с помощью виброгрохота с целью удаления богатой примесями крупной фракции, после чего для удаления водорастворимых примесей суспензия центрифугировалась и высушивалась во вращающейся сушилке при температуре 110–120 °С.

После очистки фосфогипс смешивался в равном объеме с водой и для активации процесса дегидратации в систему вводился модификатор (сукцинат натрия, цитрат калия и сульфат натрия). Дегидратация осуществлялась в условиях повышенного давления пара (1,75 кгс/см²), длительность процесса составляла 1,5–2 часа. После чего гипс отфильтровывался и сушился при температуре 130 °С. В зависимости от вида и количества модификатора авторам удалось получить α -полугидрат с пределом прочности при

сжатии от 15,2 до 28,85 МПа, максимальные показатели были достигнуты при использовании 0,20 % сукцината натрия.

Авторами патента [41] предложен способ получения вяжущего из цитрогипса путем перекристаллизации в автоклаве. При этом отход предварительно подвергают репульпации, затем он проходит стадию очистки методом безреагентной флотации под воздействием полиакриламида, после чего в полученную пульпу добавляют смесь сульфата меди и сульфата натрия в соотношении 1:2 в количестве 1,2–1,5 кг/м³ и отправляют в автоклав. Данным способом, в зависимости от количества сульфатов в смеси $\text{CuSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$, авторами было синтезировано вяжущее с прочностью на изгиб в двухчасовом возрасте 3,4–5,4 МПа и прочностью при сжатии 5,8–12,5 МПа. Данный способ выступил в качестве прототипа для разработки метода получения вяжущего из борогипса [42]. Последовательность процесса включала в себя репульпацию ГСО; извлечение дигидрата сульфата кальция путем флотации в пенный продукт, в качестве флотационных агентов, в данном случае использовалась смесь натриевых солей жирных кислот (олеат натрия, стеарат натрия, пальметат натрия) и жидкого натриевого стекла добавляемых в определенных пропорциях; обезвоживание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в автоклаве после обработки серной кислотой и гидроксидом кальция в интервале pH 2–7.

Сотрудниками Челябинского государственного университета предложен способ синтеза гипсовых вяжущих из гипсосодержащих шламов, получаемых при нейтрализации сточных вод машиностроительных и аналогичных предприятий [43]. Процесс изготовления предлагается проводить в три стадии: на первой осуществляется смешение гипсосодержащего шлама с гидролизной серной кислотой до достижения pH, равного 7...8, на второй – смешивают солянокислый раствор травления металла и доломитовую пыль уноса до pH, равного 7...8. Первые две стадии смешения осуществляются при температуре среды 70–80 °С. На третьей стадии смесь передается в сушилку «кипящего слоя», в которой при температуре 150–320 °С сушится и одновременно измельчается до размера частиц 10...15 мкм. Применение данного способа позволяет получить вяжущее с прочностью при сжатии 37,4–68,8 МПа.

В испытательной лаборатории ООО «ВНИИСТРОМ-НВ» проведены исследования по получению α -полугидрата из фосфогипса методом автоклавной обработки [44]. Сущность метода заключалась в 4-х часовой выдержке сырья при давлении 1,3 атм, дальнейшей 2-х часовой выдержке при 4 атм., 12-ти часовой

сушке (105–120 °С), дроблении и помоле. При этом авторами разработки исследовалось влияние различных добавок на процессы кристаллообразования, скорость твердения и подвижность вяжущих как по отдельности, так и в комплексе. За счет оптимизации рецептурно-технологических параметров, авторами было получено вяжущее с прочностью до 60 МПа.

На базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, сотрудниками кафедры промышленной экологии под руководством Свергузовой С.В. был разработан способ получения гипсовых вяжущих из отходов производства лимонной кислоты – цитрогипс (ОАО «ЦитроБел», г. Белгород) [45–49], сущность которого заключалась в дегидратации ГСО в растворе серной кислоты с последующей обработкой СаО. Получаемое в ходе реакции дегидратации вяжущее было представлено полугидратом сульфата кальция и ангидритом, содержание которых в системе зависело от начальной температуры гипсосодержащих отходов и мольного соотношения $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}$. Авторы разработки отмечают возможность получения данным способом вяжущего с прочностью до 30 МПа.

Данный способ был также апробирован при получении гипсового вяжущего из фосфогипса (Гебес, Тунис). В ходе эксперимента было получено вяжущее состоящее из полугидрата сульфата кальция и ангидрита с переделом прочности в возрасте 28 суток 6–10 МПа [50].

Существует достаточно большое количество исследований, направленных на изучение возможности получения, вяжущих методом прокаливания при различных температурах. В частности, в работе [22] авторы рассматривают возможность получения β -полугидрата из фосфогипса (Завод удобрений Уберабы, Штат Минас-Жерайс, Бразилия) обжиговым способом, при этом варьируемыми параметрами в исследовании выступают время пребывания в печи (1 час, 2 часа и 5 ч) и температура (120 °С, 150 °С и 200 °С), а выходными контролируемыми – процент содержания $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ в конечном продукте и энергозатраты. В ходе исследований авторами установлено, что при минимальных затратах электроэнергии при температуре 120 °С и длительности процесса 1 ч, переход дигидрата в полугидрат не обеспечивается. Оптимальными параметрами с точки зрения энергоэффективности являются температура 150 °С и длительность обработки 1 ч, при этом содержание полугидрата в конечном продукте составило – 73 %. Увеличение длительности процесса до 2 ч привело к росту энергопотребления на 28 % и содержанию полугидрата до 91 %; при 5 часовом прокаливании

расход энергии увеличился еще на 84 % в сравнении с 2-х часовым при том же содержании полугидрата – 91 %.

Исследователями в работе [51] показана возможность получения вяжущего из фосфогипса путем обжига в течении 2-х часов при температуре 180 °С. Полученное вяжущее на 75,24 % состоит из β -полугидрата и обладает прочностью на сжатие 9,6 МПа. Также авторами была рассмотрена возможность повышения прочности вяжущих за счет использования трех видов суперпластификаторов на основе поликарбоновой кислоты, нафталина (FDN) и лигнина. В ходе исследования было выявлено, что использование суперпластификаторов в количестве 0,7 % от массы позволило повысить прочность гипсового вяжущего при использовании поликарбоновой кислоты до 15 МПа, нафталина – до 14,8 МПа и лигнина – до 13,9 МПа.

Авторами работы [52] было рассмотрено влияние на технологические свойства β -полугидрата, синтезируемого из фосфогипса, взятого из открытых штабелей завода по производству удобрений (AB Lifosa, Литва), температуры воздействия в диапазоне от 100 °С до 180 °С с интервалом 20 °С, а также двух видов суперпластификаторов: на основе лигносульфоната BV 3М (Sika) и на основе канифольной смолы Vinmix (Vincents Polyline). В ходе исследований было установлено, что с ростом температуры (до 160–180 °С) закономерно сокращается время разложения (до 4 ч) фосфогипса до полугидрата, при этом незначительно увеличивается начало схватывания вяжущего. Введение в систему суперпластификаторов позволило снизить водогипсовое соотношение с 0,8 до 0,43, при этом введении BV 3М (Sika) способствовало увеличению сроков начала и конца схватывания. Использование суперпластификаторов способствовало росту прочности при сжатии в возрасте 2 ч до 15 МПа. Максимальные показатели прочности в возрасте 14 суток (29 МПа) были получены у образцов вяжущего из фосфогипса, обожженного при температуре 180 °С и содержащего в своем составе суперпластификатор на основе канифольной смолы.

Авторы работы [53] показали возможность изготовления звукоизоляционного материала, на основе β -полугидрата сульфата кальция, полученного путем прокаливания при температуре 160 °С фосфогипса (завод удобрений Hubei Yihua Fertilizer Inc. Китай). Прочность при изгибе вяжущего в возрасте 2-х часов составляла 2,6 МПа, в

сухом состоянии 4,4 МПа, прочность при сжатии в возрасте 2-х часов во влажном и сухом состоянии – 5,8 и 13,6 МПа соответственно.

УП «НИИСМ» [54] была предложена технология нейтрализации примесей фосфогипса Гомельского химического завода с последующим синтезом α - и β -полугидрата сульфата кальция. Технологический процесс очистки состоит из трех стадий: на первой в фосфогипс вводится известковое молоко (1–1,5 % CaO от массы фосфогипса); на второй – суспензия фосфогипса пропускается через мельницу мокрого помола; третья стадия – кондиционирование при прессовании высушенного до влажности 5–7 % фосфогипса. Далее в зависимости от необходимости получения той или иной модификации вяжущего выбирается тепловой агрегат для дегидратации. Авторы отмечают возможность получения вяжущего марки от Г-7 до Г-13 и выше при использовании автоклавов. В данном случае технология производства включает в себя: нейтрализацию, автоклавную обработку, совмещенную сушку и диспергирование $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$.

Группа исследователей [13, 14] при изготовлении штукатурной плитки – аналога гипсокартона, в качестве вяжущего использовала $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, полученный из фосфогипса (город Ичан, провинции Хубэй, Китай) путем предварительной промывки и прокаливания при температуре 150 °С [13] и 170 °С [14]. Особенностью технологии является то, что процесс изготовления изделий осуществлялся путем прессования (20 МПа) в водной среде предварительно изготовленных путем увлажнения вяжущего гранул. Применение такого режима формования, значительно повысило эффективность использования вяжущего и обеспечило получение изделий с пределом прочности на изгиб 18,9 МПа [13] и 14,7 МПа [14].

О повышении эффективности использования вяжущих, полученных путем прокаливания цитрогипса (ОАО «ЦитроБел», г. Белгород) при температуре 120–140 °С за счет применения метода полусухого прессования при изготовлении изделий на их основе, свидетельствуют данные представленные в патентах [55, 56]. Прочность на сжатие изделий в сухом состоянии составила 19–20 МПа [55] и 20–24 МПа [56].

Таким образом, можно выделить три основным способа переработки гипсосодержащих отходов в вяжущее. Каждый из которых имеет большое количество вариаций, а также обладает рядом достоинств и недостатков (табл. 1)

Таблица 1

Достоинства и недостатки способов производства гипсовых вяжущих из отходов промышленности

Способ производства	Достоинства	Недостатки
Синтез при повышенных температурах и атмосферном давлении	Возможность получения высокопрочного вяжущего (α -полугидрата)	Высокие энергозатраты, потребность в специальном оборудовании, длительность процесса
Метод прокаливания при низких температурах	Доступность оборудования, простота процесса производства	Возможность получения только низкосортного вяжущего (β -полугидрата)
Химический метод (солевые растворы, кислоты)	Низкие энергозатраты, возможность получения высокопрочного вяжущего (α -полугидрата)	Потребность в химических реагентах, сложность процесса, поэтапный контроль и отбор проб, создание неблагоприятных условий труда, быстрый износ оборудования

Организация промышленных производств.

Согласно данным представленным в докладе Бабкина В.В. [57] в конце двадцатого века были попытки организовать и даже функционировали предприятия по производству гипсовых вяжущих из фосфогипса. Так в частности в 1982 году был введен комплекс на базе Воскресенского ОАО «Минудобрения», который состоял из трех линий, укомплектованных импортным оборудованием фирмы «Бабок» общей мощностью 360 тыс.т/год, что позволило осуществлять частичную утилизацию фосфогипса и достигнуть годовой производительности 250 тыс. т гипса. На настоящий момент данная технология устарела и не соответствует современным требованиям, кроме того нейтрализация фосфогипса осуществлялась в растворе, в результате чего формировался поток загрязнённой жидкости и возникал вопрос относительно необходимости ее переработки.

В 1992 г. была предпринята попытка организации линии по переработки фосфогипса для Балаковского АО «Иргиз», мощностью – 216 тыс.т./год гипсового вяжущего. Технология была разработана фирмой «Salzgitter» ее отличительной особенностью являлось сухая нейтрализация фосфогипса, без образования побочных продуктов. Однако по ряду причин линия так и не была запущена.

В этом же докладе Бабакиным В.В. отмечает факт организации опытно-промышленных установок на предприятиях, где накоплены значительные запасы фосфогипса (Воскресенский филиал НИУИФ, Кингисепп, Волхов, Лермонтов), а также наличия разработок в данной области в НИУИФе, ЛенНИИГИПРОХИМе, ЛТИ им. Ленсовета, РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Большое количество работ в данном направлении было сделано под руководством доктора технических наук Мещерякова Ю.Г. основные

результаты нашли отражение в монографии [58], в которой наиболее полно представлены результаты многолетней работы, направленной на изучение свойств, разработку технологии и организацию опытно-промышленного производства гипсовых вяжущих и изделий на их основе из фосфогипса Волховского алюминиевого завода.

Необходимо отметить, что в литературных источниках не было найдено информации об организации или апробации производства вяжущих из гипсосодержащих отходов кроме фосфогипса, что объясняется крупнотоннажностью данного сырья.

По мнению Бабкина В.В. наиболее перспективный путь решения проблемы накопления фосфогипса заключается в переработке его на месте образования в серную кислоту с попутным получением вяжущих (цемента, извести) или использования в качестве наполнителя для дорожного строительства. При этом он отмечает, что наиболее оптимальной, на его взгляд, технологией переработки фосфогипса в вяжущие и изделия на их основе, является метод созданный фирмой «Knauf» [57], который имеет три варианта в зависимости от областей дельнейшего использования, получаемого вяжущего [59].

В условиях существующих реалий и ориентации на максимальное импортозамещение, возникает необходимость разработки и собственных технологических линий по переработке гипсосодержащих отходов. Накопленный научный и практический опыт в области возможных способов переработки гипсосодержащих отходов и направлений их использования дает основания говорить о возможности реализации данной идеи.

Наиболее показательным положительным примером комплексной переработки фосфогипса с получением на выходе нескольких видов товарной продукции (гипсовое вяжущее, редкоземельные элементы) является технология ГК

«Скайград». Согласно данным приведенным на сайте компании, на первой стадии технологического цикла осуществляется извлечение РЗЭ, на второй – получение гипсовых вяжущих (Г-3...Г-5). путем дегидратации в гипсоварочных котлах Авторы отмечают, что технология рентабельна только при комплексном подходе к переработке фосфогипса [60].

Выводы:

– применительно к гипсосодержащим отходам использование традиционных технологий, используемых для синтеза вяжущих из природного сырья, зачастую является не приемлемым, что обусловлено спецификой данного сырья, в частности: непостоянство их вещественного состава и содержание большого количества примесей, требующие разработки дополнительных мероприятий по очистке или корректировке технологического режима; высокая дисперсность ГСО, отрицательно сказывающаяся на свойствах вяжущего и требующая принятия корректирующих мер (введение активаторов процесса кристаллизации, суперпластификаторов, прессование, механическое воздействие и пр.);

– метод автоклавной обработки позволяет синтезировать вяжущие с хорошими физико-механическими характеристиками – α -полугидрат, однако он отличается большими энергетическими затратами и необходимостью приобретения и обслуживания специального оборудования. Наличие большого количества вариаций данного способа с дополнительным использованием методов очистки, химических реагентов для создания гидратационной среды и прочего, только увеличивают себестоимость конечного продукта и усложняют возможность организации получения вяжущего данным способом в промышленных объемах;

– способ получения, вяжущего в растворах солей, предполагает – синтез вяжущего в особых условиях, его промывку и сушку, при этом обязательным является использование различных модификаторов, обеспечивающих синтез кристаллов вяжущего необходимой морфологии, позволяющей обеспечить получение гипсового камня с физико-механическими характеристиками, отвечающими требованиям стандартов. В случае использования фосфогипса, его предварительная очистка способствует повышению качества конечного продукта, однако вносит дополнительные сложности в процесс производства и увеличивает стоимость конечного продукта. В сравнении с автоклавным, данный способ является менее энергетическим, однако, требует большого количества химических реагентов, а также строгого промежуточного контроля и оперативного корректирования процесса синтеза вяжущего,

что значительно усложняет сам процесс производства;

– синтез вяжущего в кислотах по показателям эффективности схож с методом солевых растворов, к его дополнительным недостаткам можно отнести создание неблагоприятных условий труда, а также быстрый выход из строя оборудования под воздействием агрессивной среды;

– синтез гипсовых вяжущих из ГСО методом прокаливания является технологически и организационно наиболее простым, однако сами вяжущие отличаются невысокими физико-механическими показателями. Основным способом повышения эффективности использования вяжущих, изготовленных данным способом, является применение суперпластификаторов различной природы или специальных приемов формования изделий (полусухое прессование, прессование в водной среде), нивелирующих недостатки вяжущего и позволяющие получать изделия с высокими показателями прочности при изгибе и сжатии;

– не смотря на большое количество исследований, в настоящее время в России нет действующего производства, направленного на переработку гипсосодержащих отходов с синтезом вяжущего в промышленных объемах. Научные результаты, полученные большим количеством исследователей, в основном направлены на сам факт установления возможности переработки того или иного сырья, незначительная часть таких разработок прошла промышленную апробацию в условиях существующих заводов по производству гипсовых вяжущих, также есть сведения об организации небольших опытных производств, основная часть из которых направлена на переработку фосфогипса, как наиболее крупнотоннажного и повсеместно распространенного вида ГСО;

– основным условием создания рентабельной технологии переработки ГСО, представляется возможность комплексной переработки сырья с получением на выходе не только вяжущих, но и других кондиционных продуктов с минимальным образованием вторичных побочных продуктов. Создание такой технологии и ее реализация в промышленных масштабах позволит существенно увеличить объемы перерабатываемых гипсосодержащих отходов, что позволит решить не только экологические вопросы, но и расширять сырьевую базу регионов, где остро стоят данные вопросы.

Благодарность. Работа выполнена в рамках реализации деятельности Научно-образовательного центра мирового уровня «Инновационные решения в АПК», Соглашение № 050, от 07.08.2020

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.049
2. Huang Y., Qian J., Kang X., Yu J., Fan Y., Dang Y., Zhang W., Wang S. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P_2O_5 and F on the clinker formation and cement performances // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203. Pp. 432–442. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.112
3. Kacimi L., Simon-Masseron A., Ghomari A., Derriche Z. Reduction of clinkerization temperature by using phosphogypsum // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 137. Pp. 129–137. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.12.053
4. Islam G.M.S., Chowdhury F.H., Raihan, M.T., Amit S.K.S., Islam M.R. Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. Pp. 744–751. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.440
5. Huang Y., Qian J., Lu L., Zhang W., Wang S., Wang W., Cheng X. Phosphogypsum as a component of calcium sulfoaluminate cement: Hazardous elements immobilization, radioactivity and performances // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 248. 119287. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119287
6. Sevim U.K., Tumen Y. Strength and fresh properties of borogypsum concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 342–347. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.054
7. Amrani M., Taha Y., Kchikach A., Benzaazoua M., Hakkou R. Phosphogypsum recycling: New horizons for a more sustainable road material application // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 30. 101267. https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101267
8. Shen W., Zhou M., Ma W., Hub J., Cai Z. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 164. Pp. 99–104. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.125
9. Cuadri A.A., Navarro F.J., García-Morales M., Bolívar J.P. Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier // *Journal of Hazardous Materials*. 2014. Vol. 279. Pp. 11–16. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.058
10. Tian T., Yun Y., Hu Z.H., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete // *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 115. Pp. 143–152. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028
11. Vaicūkytė D., Nizevičiūtė D., Kiele A., Janavičius E., Pupeikis D. Effect of phosphogypsum on the stability upon firing treatment of alkali-activated slag // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 184. Pp. 485–491. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.213
12. López F.A., Gázquez M., Alguacil F.J., Bolívar J.P., García-Díaz I., López-Coto I. Microencapsulation of phosphogypsum into a sulfur polymer matrix: physico-chemical and radiological characterization // *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 192. Pp. 234–245. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.05.010
13. Zhou J., Sheng Z., Li T., Shu Z., Wang Y. Preparation of hardened tiles from waste phosphogypsum by a new intermittent pressing hydration // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42, Iss. 61. Pp. 7237–7245. https://doi.org.ezproxy.libfl.ru/10.1016/j.ceramint.2016.01.117
14. Zhou J., Li X., Zhao Y., Shu Z., Wang Y., Zhang Y., Shen X. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 243. 118091. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118091
15. Romero-Hermida M.I., Borrero-López A.M., Alejandro F.J., Flores-Alés V., Santos A., Franco J.M., Esquivias L. Phosphogypsum waste lime as a promising substitute of commercial limes: A rheological approach // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 95. Pp. 205–216. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.007
16. Винниченко В.И., Костюк Т.А., Мокренко Н.Н., Иващенко Т.Г. Строительные материалы на основе фосфогипса // *Сухие строительные смеси*. 2014. №3. С. 18–19
17. Tian T., Yun Y., Hu Z.H., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete // *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 115. Pp. 143–152. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028
18. Contreras M., Teixeira S.R., Santos G.T.A., Gázquez M.J., Romero M., Bolívar J.P. Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 175. Pp. 588–600. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.131
19. Türkel S., Aksin E. A comparative study on the use of fly ash and phosphogypsum in the brick production // *Sadhana*. 2012. Vol. 37. Pp. 595–607. https://doi.org/10.1007/s12046-012-0099-8
20. Василенко Т.А., Али Салех-Жафер Физико-механические свойства керамзитового графия, полученного с использованием кальцийсодержащих техногенных материалов // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-

2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19899> (дата обращения: 04.05.2020).
21. Li X., Zhang Q., Ke B., Wang X., Li L., Li X., Mao S. Insight into the effect of maleic acid on the preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in Na_2SO_4 solution // *Journal of Crystal Growth*. 2018. Vol. 493. Pp. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.04.025>
22. Geraldo R.H., Costa A.R.D., Kanai J., Silva J.S., Souza J.D., Andrade H.M.C., Gonçalves J.P., Fontanini P.S.P., Camarin G. Calcination parameters on phosphogypsum waste recycling // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 256. 119406. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119406>
23. Baoguo, Su Y., Lu W., Qi H., Hu P. Effect of calcium sulphoaluminate cement on mechanical strength and waterproof properties of beta-hemihydrate phosphogypsum // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 242. 118198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118198>
24. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar // *Journal of Cleaner Production*. 2016. 127. 204–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>
25. Черныш Л.И. Повышение эффективности строительных композитов, полученных с использованием техногенных отходов // *Экология и промышленность*. 2014. № 4 (41). С. 87–89.
26. Liu S., Wang L., Yu B. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the phosphogypsum-based supersulfated cement // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 21430. Pp. 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052>
27. Liu S., Ouyang J., Ren J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 24320. 118226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118226>
28. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей редакцией А.В. Ферронской. Изд-во АСВ, 2004. 488 с.
29. Cánovas C.R., Macías F., Pérez-López R., Basallote M.D., Millán-Becerro R. Valorization of wastes from the fertilizer industry: Current status and future trends // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 17410. Pp. 678–690. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.293
30. Moalla R., Gargouri, M., Khmiri F., Kamoun L., Zairi M. Phosphogypsum purification for plaster production: A process optimization using full factorial design // *Environmental Engineering Research*. 2018. Vol. 23. Iss. 1. Pp. 36–45. doi:10.1016/j.tca.2018.01.011
31. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Pp. 122–123. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
32. Li X., Zhang Q., Shen Z., Li L., Li X., Ma S. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in CaCl_2 solution // *Journal of Crystal Growth*. 2019. 511. Pp. 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027>
33. Lu W., Ma B., Su Y., He X., Jin Z., Qi H. Preparation of α -hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl_2 solution // *Construction and Building Materials*. 2019. 214. Pp. 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148>
34. Ma B., Lu W., Su Y., Li Y., Gao C., He X. Synthesis of α -hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 195. 396e405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.228>
35. Guan B., Yang L., Wu Z., Shen Z., Ma X., Qingqing Ye Preparation of α -calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in K, Mg-containing concentrated CaCl_2 solution under mild conditions // *Fuel*. 2009. Vol. 88. Pp. 1286–1293. doi:10.1016/j.fuel.2009.01.004
36. Shen Z.X., Guan B.H., Fu H.L., Yang L. Effect of Potassium Sodium Tartrate and Sodium Citrate on the Preparation of α -Calcium Sulfate Hemihydrate from Flue Gas Desulfurization Gypsum in a Concentrated Electrolyte Solution // *J. Am. Ceram. Soc.*, 2009. Vol. 92 (12). Pp. 2894–2899. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03330.x
37. Guan B., Kong B., Fu H., Yu J., Jiang G., Yang L. Pilot scale preparation of α -calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in Ca–K–Mg aqueous solution under atmospheric pressure // *Fuel*. 2012. Vol. 98. Pp. 48–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.032>
38. Jiang G., Wang H., Chen Q., Zhang X., Wu Z., Guan B. Preparation of alpha-calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in chloride-free $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution under mild conditions // *Fuel*. 2016. Vol. 174. Pp. 235–241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.073>
39. Yang J., Liu W., Zhang L., Xiao B. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. Pp. 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.011>
40. Garg M., Jain N., Singh M. Development of alpha plaster from phosphogypsum for cementitious binders // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. Pp. 3138–3143. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.024
41. Патент на изобретение 2210540, РФ, Способ получения гипсового вяжущего / Мясников Н.Ф., Бершаков Н.Г., Козлов В.П., Наумов Е.Г.,

Шевченко Н.Н., заявитель и патентообладатель Мясников Н.Ф., Бершаков Н.Г., Козлов В.П., Наумов Е.Г., Шевченко Н.Н. № 2002113559/12; заявл. 27.05.2002; опубл. 20.08.2003, Бюл. №23.

42. Патент на изобретение 2324654, РФ, Способ переработки гипсосодержащего сырья / Семлёв В.С., Реутов В.А., Кондриков Н.Б., заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. универ. 2006127319/15; заявл. 27.07.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. №14.

43. Патент на изобретение 2703644, РФ, Способ получения гипсового вяжущего из гипсосодержащего шлама / Добровольский И.П., Бархатов В.И., Капкаев Ю.Ш., Головачев И.В., заявитель и патентообладатель Челяб. гос. универ. 2019118370; заявл. 13.06.2019; опубл. 21.10.2019, Бюл. №30.

44. Сапелин Н.А., Хохлов В.Н. Получение гипсового вяжущего α -модификации из природного сырья и фосфогипса // Сухие строительные смеси. 2012. №1. С. 25–27.

45. Свергузова С.В., Чернышева Н.В., Черныш Л.И., Шамшуров А.В. Влияние условий обработки цитрогипса на состав получаемого гипсового вяжущего // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 31–32.

46. Свергузова С.В., Тарасова Г.И., Бубнова Н.Ю. Перспективные технологии переработки цитрогипса // Экология и промышленность России. 1998. № 8. С. 20–24.

47. Свергузова С.В., Бубнова Н.Ю., Тарасова Г.И. Утилизация гипсосодержащих отходов по энергосберегающей технологии // Наука – производству. 2001. № 3. С. 41–43.

48. Свергузова С.В., Чернышева Н.В., Черныш Л.И., Шамшуров А.В. Влияние условий обработки цитрогипса на состав получаемого гипсового вяжущего // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 31–32.

49. Свергузова С.В., Тарасова Г.И., Чернышева Н.В., Черныш Л.И. Теоретическое обоснование возможности безобжиговой дегидратации цитрогипса // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2010. № 2. С. 117–121.

50. Чернышева Н.В., Свергузова С.В., Тарасова Г.И. Получение гипсового вяжущего из фосфогипса Туниса // Строительные материалы. 2010. №7. С. 28–30.

51. Zheng, S.-C., Yu, Q., Ning, P., Ma, J.-B., Zheng, Y.-L. Preparation of β -hemihydrate gypsum with phosphogypsum // Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry. 2015. Vol. 35, Iss. 5. Pp. 60–63

52. Bumanis G., Zorica J., Bajare D., Korjamins A. Technological properties of phosphogypsum binder obtained from fertilizer production waste // Energy Procedia. 2018. Vol. 147. Pp. 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.096>

53. Ma B., Jin Z., Su Y., Lu W., Qi H., Hu P. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. 117346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117346>

54. Губская А.Г., Подлuzский Е.Я., Меленько В.С. Производство гипсового вяжущего и изделий из природного и техногенного сырья в Республике Беларусь // Строительные материалы. 2018. №3. С. 73–75.

55. Патент на изобретение 2693808, РФ, Сырьевая смесь для изделий из модифицированного цитрогипса и способ их изготовления / Алфимова Н.И., Титенко А.А., Никулин И.С., Галдун Ю.В., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю.; заявитель и патентообладатель Белг. гос. тех. универ. им. В.Г. Шухова – № 2018126092; заявл. 13.07.2018; опубл. 04.07.2019, Бюл. №19 (П.ч.) 5 с.

56. Патент на изобретение 2695313 РФ. Сырьевая смесь для опилкобетона и способ изготовления изделий из опилкобетона / Алфимова Н.И., Титенко А.А., Никулин И.С., Галдун Ю.В., Пириева С.Ю., Чепурных А.А.; заявитель и патентообладатель Белг. гос. тех. универ. им. В.Г. Шухова – № 2018126082; заявл. 13.07.2018; опубл. 23.07.2019, Бюл. №21(П.ч.). 5 с

57. Бабкин В.В. Успенский Д.Д. Новая стратегия: Химия 2030. Высокие переделы сырья. Кластеризация. Химизация индустрии. РФ. М.: Изд-во «Лика», 2015. 222 с.

58. Деревянко В.Н., Тельянов В.А. Технологии производства гипсовых вяжущих материалов из фосфогипса // Вісник ПДАБА. 2010. №2-3. С. 143–144

59. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Промышленная переработка фосфогипса. СПб.: Изд-во «Стройиздат СПб», 2007. 104 с.

60. Сайт ГК «Скайград» Интернет ресурс: <http://sky-grad.ru/>

Информация об авторах

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: alfimovan@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46.

Пириева Севда Юнисовна, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: p-sevda@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46.

Елистраткин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, г. Белгород, Костюкова, д. 46.

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Титенко Алексей Анатольевич, инженер. E-mail: krovvelshik31@mail.ru. ООО «Инжиниринговый центр» НИУ «БелГУ». Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, д.85.

Поступила 28.10.2020

© Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А., 2020

^{1,*}Alfimova N.I., ¹Pirieva S.Yu., ¹Elistratkin M.Yu., ¹Kozhuhova N.I. ²Titenko A.A.

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

²Engineering Center NRU "BelSU"

*E-mail:alfimovan@mail.ru

PRODUCTION METHODS OF BINDERS CONTAINING GYPSUM-BEARING WASTES: A REVIEW

Abstract. A large amount of research publications and analytical data, concerning gypsum-bearing wastes (GSW) gives an understanding of their huge volumes in many countries, as well as the urgent need to find solutions and opportunities that open up in the development and implementation of effective technologies for the disposal of GSW in various areas of the construction industry. In this paper, the review of actual technological approaches for recycling of GSW in the framework of such field of utilization as a gypsum binder production. It was found, that application of traditional technologies of synthesis of binders, containing natural raw materials is not reasonable for GSW-bearing binders due to variation in component composition, high concentration of impurities, and high dispersion. For this reason, the most advanced technologies proposed by various researchers provide for measures to correct these shortcomings or involve the synthesis of the final product - a high-quality gypsum binder, which is based on different principles - growing crystals of the desired geometry and properties in salt and acid solutions. These technologies are characterized by complexity, a negative impact on equipment, and personnel. In addition, they lead to the formation of secondary waste, which reduces the attractiveness of their practical implementation. Synthesis of GSW-bearing binders using the method of calcining is the simplest technologically and organizationally, but the binders are characterized by unsatisfactory physical and mechanical properties. The desired way to increase their profitability and investment attractiveness is the possibility of providing comprehensive processing of raw materials, where the final product will be not only binders but also other conditioned products, taking into account the minimum formation of secondary waste. The development of such technology of GSW recycling and its implementation on a commercial scale will allow increasing the volume of GSW recycling as well as to solve the ecological aspects and to expand the raw materials source base in regions where this problem is actual

Keywords: gypsum-bearing wastes, phosphogypsum, borogypsum, citrogypsum, α -hemihydrate of gypsum, β -hemihydrate of gypsum, autoclave treatment, chemical solutions

REFERENCES

1. Plaster materials and products (production and use). Directory [Gipsovy materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye). Spravochnik]. Edited by A.V. Ferronskaya. Publishing House ASV, 2004. 488 p. (rus)
2. Mineral Commodity Summaries, 2020. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Pp. 122–123. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2020.pdf>
3. Rashad A.M. Phosphogypsum as a construction material. Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 732–743. doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.049.
4. Tayibi H., Choura M., Lo'pez F.A., Alguacil F.J., Lo'pez-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90, Iss. 8, Pp. 2377–2386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>
5. Huang Y., Qian J., Kang X., Yu J., Fan Y., Dang Y., Zhang W., Wang S. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: Influence of P₂O₅ and F on the clinker formation and cement performances. Construction and Building

Materials. 2019. Vol. 203. Pp. 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.112>

6. Kacimi L., Simon-Masseron A., Ghomari A., Derriche Z. Reduction of clinkerization temperature by using phosphogypsum. *Journal of Hazardous Materials*. 2006. Vol. 137. Pp. 129–137. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.12.053

7. Taher M.A. Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 52, Iss. 1. Pp. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.008>

8. Islam G.M.S., Chowdhury F.H., Raihan, M.T., Amit S.K.S., Islam M.R. Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 171. Pp. 744–751. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.440>

9. Huang Y., Qian J., Lu L., Zhang W., Wang S., Wang W., Cheng X. Phosphogypsum as a component of calcium sulfoaluminate cement: Hazardous elements immobilization, radioactivity and performances. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 2481. 119287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119287>

10. Ozkul M.H. Utilization of citro- and desulphogypsum as set retarders in Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30. Pp. 1755–1758. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00409-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00409-9)

11. Bensted J. Early hydration behaviour of portland cement containing boro-, citro- and desulphogypsum. *Cement and Concrete Research*. 1980. Vol. 10, Iss. 2. Pp. 165–171. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90073-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90073-3)

12. Elbeyli İ.Y., Derun M., Gülen J., Pişkin S. Thermal analysis of borogypsum and its effects on the physical properties of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, Iss. 11. Pp. 1729–1735. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00110-8)

13. Sevim U.K., Tumen Y. Strength and fresh properties of borogypsum concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. Pp. 342–347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.054>

14. Yang J., Liu W., Zhang L., Xiao B. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum. *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. Pp. 687–693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.011>

15. Myasnikov N.F., Bershakov N.G., Kozlov V.P., Naumov E.G., Shevchenko N.N. Gypsum binder preparation method. Patent RF, no. 2210540, 2003.

16. Semlyov V.S., Reutov V.A., Kondrikov N.B. Method of recycling gypsiferous raw materials. Patent RF, no. 2324654, 2008.

17. Gubskaya, A.G., Podluzsky E.Ya., Melenko V.S. Production of gypsum binder and products from natural and industrial raw materials in the Republic of Belarus [Proizvodstvo gipsovogo vyazhushchego i izdelij iz prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya v Respublike Belarus']. *Building Materials*. 2018. No. 3. Pp. 73–75. (rus)

18. Ma B., Jin Z., Su Y., Lu W., Qi H., Hu P. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. 117346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117346>

19. Li X., Zhang Q., Ke B., Wang X., Li L., Li X., Mao S. Insight into the effect of maleic acid on the preparation of a-hemihydrate gypsum from phosphogypsum in Na₂SO₄ solution. *Journal of Crystal Growth*. 2018. Vol. 493. Pp. 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.04.025>

20. Li X., Zhang Q., Shen Z., Li L., Li X., Ma S. L-aspartic acid: A crystal modifier for preparation of hemihydrate from phosphogypsum in CaCl₂ solution. *Journal of Crystal Growth*. 2019. 511. Pp. 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.01.027>

21. Lu W., Ma B., Su Y., He X., Jin Z., Qi H. Preparation of a-hemihydrate gypsum from phosphogypsum in recycling CaCl₂ solution. *Construction and Building Materials*. 2019. 214. Pp. 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.148>

22. Ma B., Lu W., Su Y., Li Y., Gao C., He X. Synthesis of a-hemihydrate gypsum from cleaner phosphogypsum. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 195. 396e405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.228>

23. Guan B., Yang L., Wu Z., Shen Z., Ma X., Qingqing Ye. Preparation of a-calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in K, Mg-containing concentrated CaCl₂ solution under mild conditions. *Fuel*. 2009. Vol. 88. Pp. 1286–1293. doi:10.1016/j.fuel.2009.01.004

24. Shen Z.X., Guan B.H., Fu H.L., Yang L. Effect of Potassium Sodium Tartrate and Sodium Citrate on the Preparation of a-Calcium Sulfate Hemihydrate from Flue Gas Desulfurization Gypsum in a Concentrated Electrolyte Solution. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2009. Vol. 92 (12). Pp. 2894–2899. doi:10.1111/j.1551-2916.2009.03330.x

25. Guan B., Kong B., Fu H., Yu J., Jiang G., Yang L. Pilot scale preparation of a-calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum in Ca–K–Mg aqueous solution under atmospheric pressure. *Fuel*. 2012. Vol. 98. Pp. 48–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.032>

26. Tarasova G.I., Sverguzova S.V., Bubnova N.Yu., Kozlov V.P., Naumov E.G. Method of gypsum article making. Patent RF, no. 2132310, 1999.

27. Sverguzova S.V., Tarasova G.I., Bubnova N.Yu. Promising technologies for the processing of citrogypsum [Perspektivnye tekhnologii pererabotki citrogipsa]. Ecology and Industry of Russia. 1998. No. 8. Pp. 20–24. (rus)
28. Sverguzova S.V., Bubnova N.Yu., Tarasova G.I. Utilization of gypsum-containing waste by energy-saving technology [Utilizatsiya gipsosoderzhashchih othodov po energosberegayushchej tekhnologii]. Science - production. 2001. No. 3. Pp. 41–43. (rus)
29. Sverguzova S.V., Chernysheva N.V., Chernysh L.I., Shamshurov A.V. The influence of the processing conditions of citrogypsum on the composition of the obtained gypsum binder [Vliyanie uslovij obrabotki citrogipsa na sostav poluchaemogo gipsovogo vyazhushchego]. Building Materials. 2010. No. 7. Pp. 31–32. (rus)
30. Sverguzova S.V., Tarasova G.I., Chernysheva N.V., Chernysh L.I. Theoretical substantiation of the possibility of non-fired dehydration of citrogypsum [Teoreticheskoe obosnovanie vozmozhnosti bezobzhigovoj degidratsii citrogipsa]. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2010. No. 2. Pp. 117–121. (rus)
31. Chernysheva N.V., Sverguzova S.V., Tarasova G.I. Obtaining a gypsum binder from phosphogypsum of Tunisia [Poluchenie gipsovogo vyazhushchego iz fosfogipsa Tunisa]. Building Materials. 2010. No. 7. Pp. 28–30. (rus)
32. Jin Z., Ma Baoguo, Su Y., Lu W., Qi H., Hu P. Effect of calcium sulphoaluminate cement on mechanical strength and waterproof properties of beta-hemihydrate phosphogypsum. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 242. 118198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118198>
33. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar. Journal of Cleaner Production. 2016. 127. 204–213. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.054>
34. Chernysh L.I. Improving the efficiency of building composites obtained using industrial waste [Povyshenie effektivnosti stroitel'nyh kompozitov, poluchennyh s ispol'zovaniem tekhnogennyh othodov]. Ecology and Industry. 2014. No. 4 (41). Pp. 87–89. (rus)
35. Lukyanova A.N., Starostina I.V. Building composite materials based on modified gypsum binders obtained from industrial wastes [Stroitel'nye kompozicionnye materialy na osnove modifitsirovannyh gipsovyh vyazhushchih, poluchennyh iz othodov proizvodstva]. Fundamental Research. 2013. No. 4–4. Pp. 818–822. (rus)
36. Romero-Hermida M.I., Borrero-López A.M., Alejandre F.J., Flores-Alés V., Santos A., Franco J.M., Esquivias L. Phosphogypsum waste lime as a promising substitute of commercial limes: A rheological approach. Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 95. Pp. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.007>
37. Vinnichenko V.I., Kostyuk T.A., Mokrenko N.N., Ivaschenko T.G. The possibility of obtaining building materials based on phosphogypsum [Stroitel'nye materialy na osnove fosfogipsa]. Dry building mixes. 2014. No. 3. Pp. 18–19. (rus)
38. Ma B., Jin Z., Su Y., Lu W., Qi H., Hu P. Utilization of hemihydrate phosphogypsum for the preparation of porous sound absorbing material. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 234. 117346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117346>
39. Zhou J., Sheng Z., Li T., Shu Z., Wang Y. Preparation of hardened tiles from waste phosphogypsum by a new intermittent pressing hydration. Ceramics International. 2016. Vol. 42, Iss. 61. Pp. 7237–7245. <https://doi.org.ezproxy.libfl.ru/10.1016/j.ceramint.2016.01.117>
40. Zhou J., Li X., Zhao Y., Shu Z., Wang Y., Zhang Y., Shen X. Preparation of paper-free and fiber-free plasterboard with high strength using phosphogypsum. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 243. 118091. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118091>
41. Petropavlovskaya V.B., Belov V.V., Novichenkova T.B., Buryanov A.F., Poleonova Yu.Yu., Petropavlovsky K.S. Resource-saving non-fired gypsum composites [Resursosberegayushchie bezobzhigovye gipsovye kompozity]. Building materials. 2015. No. 6. Pp. 79–81. (rus)
42. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Buryanov A.F. Improving the technological properties of non-fired hyper-pressed gypsum products [Povyshenie tekhnologicheskikh svoystv bezobzhigovyh giperpressovannyh gipsovyh izdelij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 6. P. 75–78. (rus)
43. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Novichenkova T.B., Poleonova Yu.Yu. About the effect of nanofillers on the properties of non-fired gypsum composites [Vliyanii nanonapolnitelej na svoystva bezobzhigovyh gipsovyh kompozitov]. Actual problems of modern science, technology and education. 2013. Vol. 2. No. 71. Pp. 217–220. (rus)
44. Petropavlovskaya V.B. Low-energy gypsum materials and products based on industrial waste [Maloenergoemkie gipsovye materialy i izdeliya na osnove othodov promyshlennosti]. Building Materials. 2006. No. 7. Pp. 8–9. (rus)
45. Mirsaev R.N., Babkov V.V., Nedoseko I.V., Yunusova S.S., Akhmadulina I.I., Shayakhmetov U.S. Structural formation and hardening of pressed compositions based on calcium sulfate dehydrate [Strukturoobrazovanie i tverdenie pressovannyh

kompozicij na osnovе digidrata sul'fata kal'ciya]. Building Materials. 2009. No. 6. Pp. 6–9. (rus)

46. Alfimova N.I., Titenko A.A., Nikulin I.S., Galdun Yu.V., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu. Raw mix for products from modified citrogypsum and method for their manufacture. Patent RF, no. 2693808, 2018.

47. Alfimova N.I., Titenko A.A., Nikulin I.S., Galdun Yu.V., Pirieva S.Yu., Chepurnyh A.A. Raw mix for sawdust concrete and a method of manufacturing products from sawdust concrete. Patent RF, no. 2695313, 2018.

48. Hua S., Wang K., Yao X. Developing high performance phosphogypsum-based cementitious materials for oil-well cementing through a step-by-step optimization method. Cement and Concrete Composites. 2016. Vol. 72. Pp. 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.017>

49. Edamenko A.S., Klimenko V.G. About the possibility of using technogenic raw materials in the production of building materials [O vozmozhnosti ispol'zovaniya tekhnogennogo syr'ya v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. Internet magazine "Technosphere safety technologies". 2013. Issue No. 1 (47). <http://ipb.mos.ru/ttb> (rus)

50. Tian T., Yun Y., Hu Z.H., Chen Y., Shi J. Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 115. Pp. 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>

51. Yang L., Yan Y., Hu Z. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 4. Pp. 600–606. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.070>

52. López F.A., Gázquez M., Alguacil F.J., Bolívar J.P., García-Díaz I., López-Coto I. Microencapsulation of phosphogypsum into a sulfur polymer matrix: physico-chemical and radiological characterization. Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 192. Pp. 234–245. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.05.010

53. Vaic'iukyniene D., Nizevičienė D., Kiele A., Janavičius E., Pupeikis D. Effect of phosphogypsum on the stability upon firing treatment of alkali-activated slag. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 184. Pp. 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.213>

54. Rashad A.M. Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles. Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 87. 717e725. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.080>

55. Liu S., Wang L., Yu B. Effect of modified phosphogypsum on the hydration properties of the

phosphogypsum-based supersulfated cement. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 21430. Pp. 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.052>

56. Liu S., Ouyang J., Ren J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 24320. 118226

57. Emrullahoglu Abi C.B. Effect of borogypsum on brick properties. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 59. Pp. 195–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.012>

58. Türkel S., Aksin E. A comparative study on the use of fly ash and phosphogypsum in the brick production. Sadhana. 2012. Vol. 37. Pp. 595–607. <https://doi.org/10.1007/s12046-012-0099-8>

59. Contreras M., Teixeira S.R., Santos G.T.A., Gázquez M.J., Romero M., Bolívar J.P. Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 17530. Pp. 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.131>

60. Vasilenko T.A., Ali Saleh-Jafer Physical and mechanical properties of expanded clay gravel obtained using calcium-containing technogenic materials [Fiziko-mekhanicheskie svoystva keramzitovogo graviya, poluchennogo s ispol'zovaniem kal'cijsoderzhashchih tekhnogennyh materialov]. Modern problems of science and education. 2015. No. 1-2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=19899> (accessed on 04.05.2020). (rus)

61. Amrani M., Taha Y., Kchikach A., Benzaazoua M., Hakkou R. Phosphogypsum recycling: New horizons for a more sustainable road material application. Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. 101267. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101267>

62. Shen W., Zhou M., Ma W., Hub J., Cai Z. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 164. Pp. 99–104. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.125

63. Folek S., Walawska B., Wilczek B., Miokiewicz J. Use of phosphogypsum in road construction. Journal of Building Engineering. 2011. 13(2). Pp. 18–22. 10.2478/v10026-011-0018-5

64. Cuadri A.A., Navarro F.J., García-Morales M., Bolívar J.P. Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier. Journal of Hazardous Materials. 2014. Vol. 279. Pp. 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.058>

65. Kochetkov A.V., Shchegoleva N.V., Korotkovskij S.A., Talalaj V.V., Vasil'ev Yu.E., Shashkov I.G. The device layers of transport structures from phosphogypsum hemihydrate (waste by-product of

the production of nitrogen-phosphorus fertilizers) [Ustrojstvo sloev transportnyh sooruzhenij iz fosfogipsa polugidrata (othoda-pobochnogo produkta proizvodstva azotno-fosfornyh udobrenij)]. Internet-magazine "Transport facilities». 2019. No. 1. <https://t-s.today/PDF/18SATS119.pdf>. doi: 10.15862/18SATS119 (rus)

66.Gerasimov D.V., Ignatiev A.A., Gotovtsev V.M., Golikov I.V. Prospects for the use of phosphogypsum in the production of asphalt concrete [Perspektivy ispol'zovaniya fosfogipsa v proizvodstve asfal'tobetona]. Roads and bridges. 2018. No. 40. Pp. 304–315. (rus)

Information about the authors

Alfimova, Nataliya I. PhD, Associate professor. E-mail: alfimovan@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Pirieva, Sevda Yu. Postgraduate student. E-mail: p-sevda@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Elistratkin, Mihail Yu. PhD, Associate professor. E-mail: mr.elistratkin@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Kozhuhova, Natalia I. PhD, Associate professor. E-mail: kozuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Titenko, Aleksey A. Engineering Center NRU «BelSU». Belgorod, 2a/712, Koroleva st., Belgorod, 308015, Russia.

Received 28.10.2020

Для цитирования:

Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Елистраткин М.Ю., Кожухова Н.И., Титенко А.А. Обзорный анализ способов получения вяжущих из гипсосодержащих отходов промышленных производств // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23

For citation:

Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Elistratkin M.Yu., Kozhuhova N.I., Titenko A.A. Production methods of binders containing gypsum-bearing wastes: a review. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-8-23

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-24-31

Ястремский Д.А.

Тюменский индустриальный университет

E-mail: yaster.dmitry@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО СО СТАБИЛИЗИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ МЕТОДАМИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Аннотация. Увеличение объемов щебеночно-мастичного асфальтобетона, применяемого в верхних слоях покрытий автомобильных дорог, требует разработки эффективных стабилизирующих добавок, обеспечивающих однородность асфальтобетонной смеси в период кратковременного хранения и транспортировки, а также улучшение свойств асфальтобетона. К числу таких добавок можно отнести комплексную стабилизирующую добавку следующего состава: 90 % целлюлозные волокна из макулатуры, 5 % резиновый порошок, 5 % вязкий нефтяной битум марки БНД 90/130. В данной статье приведены результаты исследования битума с добавкой «Viator 66» и комплексной целлюлозосодержащей стабилизирующей добавкой (КСД). С помощью метода ИК-Фурье спектроскопии получены графические данные, в результате анализа которых установлено, что взаимодействие стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона с битумом приводит к появлению дополнительных полос поглощения, характерных для ароматических соединений (CH, бензольного кольца), серосодержащих функциональных групп $S=O$ st, $R-SO-R$, $R-SO-OH$, $R-SO_2-R$, $C=S$ st, а также для групп $C-O-H$. Рентгеноспектральный анализ подтвердил наличие дополнительных серосодержащих спектров в составе стабилизирующих добавок. Установлено, что в зависимости от химического состава стабилизирующих добавок, физико-механические характеристики битумного вяжущего и полученного асфальтобетона изменяются.

Ключевые слова: асфальтобетон, щебеночно-мастичный асфальтобетон, стабилизирующая добавка, инфракрасная спектроскопия, битум.

Введение. В настоящее время одним из самых распространённых материалов при устройстве верхних слоев покрытий автомобильных дорог является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА). Свою популярность он получил за счёт высоких прочностных характеристик, которые позволяют сделать такой материал наиболее долговечным. Примечательно то, что в отличие от традиционных асфальтобетонов в составе ЩМА присутствуют стабилизирующие добавки, основная задача которых предотвратить расслоение смеси в период кратковременного хранения и укладки асфальтобетона. Авторами в данной работе было изучено влияние стабилизирующих добавок на битум БНД 90/130 с помощью ИК-Фурье спектроскопии и рентгеноспектрального анализа. Битумы представляют собой сложную смесь высокомолекулярных углеводородов нефтяного происхождения, в том числе парафиновых (C_nH_{2n+2}), нафтеновых (C_nH_{2n}), ароматических (C_nH_{2n-6}) рядов, а также их производных, содержащих кислород, серу, азот и комплексные соединения металлов. Введение стабилизирующих добавок различной природы и химического состава позволит модифицировать битум, улучшая его реологические характеристики [1-10].

Методика. Для проведения качественного и количественного фазового анализа был применён метод ИК-Фурье спектроскопии на приборе

«Nicolet iS10». Метод инфракрасной спектроскопии является универсальным физико-химическим методом, который применяется в исследовании структурных особенностей различных органических и неорганических соединений. Метод основан на явлении поглощения группами атомов испытуемого объекта электромагнитных излучений в инфракрасном диапазоне. Поглощение связано с возбуждением молекулярных колебаний квантами инфракрасного света. При облучении молекулы инфракрасным излучением поглощаются только те кванты, частоты которых соответствуют частотам валентных, деформационных колебаний молекул. Достоинства ИК-Фурье спектрометра: высокое отношение сигнал - шум, возможность работы в широком диапазоне длин волн без смены диспергирующего элемента, быстрая регистрация спектра, высокая разрешающая способность до $0,001\text{ см}^{-1}$.

Результатом исследования является зависимость интенсивности рассеянного излучения от угла рассеяния [11]. Исследование проводилось на образцах: №1 Битум БНД 90/130; № 2 Битум БНД 90/130 + «Viator 66»; № 3 Битум БНД 90/130 + КСД. ИК спектры соединений регистрировали в диапазоне $4000-400\text{ см}^{-1}$ (рис. 1). Обработку результатов исследования проводили с помощью программного комплекса «OMNIC».

Подготовка образцов исследования прово-

дилась следующим образом: из заранее подготовленных образцов № 1, № 2, № 3 была отобрана средняя проба битума. Данные пробы тщательно перемешивались с порошком КВг в соотношении 1:100, после чего помещались в ИК-Фурье спектрофотометр «Nicolet iS10», с помощью которого

была произведена запись ИК спектров всех образцов.

Основная часть. Результаты ИК-Фурье спектроскопии образцов № 1, № 2, № 3 приведены на рис. 1.

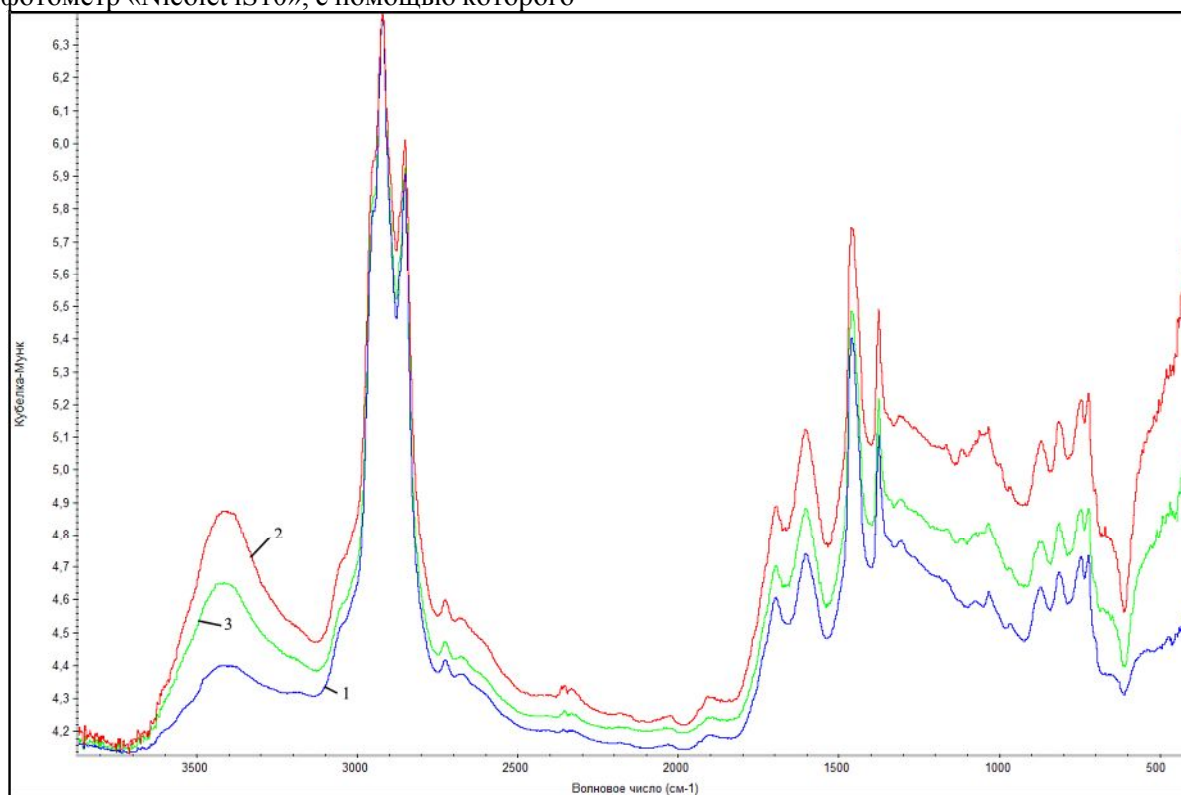


Рис. 1. ИК спектры образцов: № 1 Битум БНД 90/130; № 2 Битум БНД 90/130 + «Viator 66»; № 3 Битум БНД 90/130 + КСД

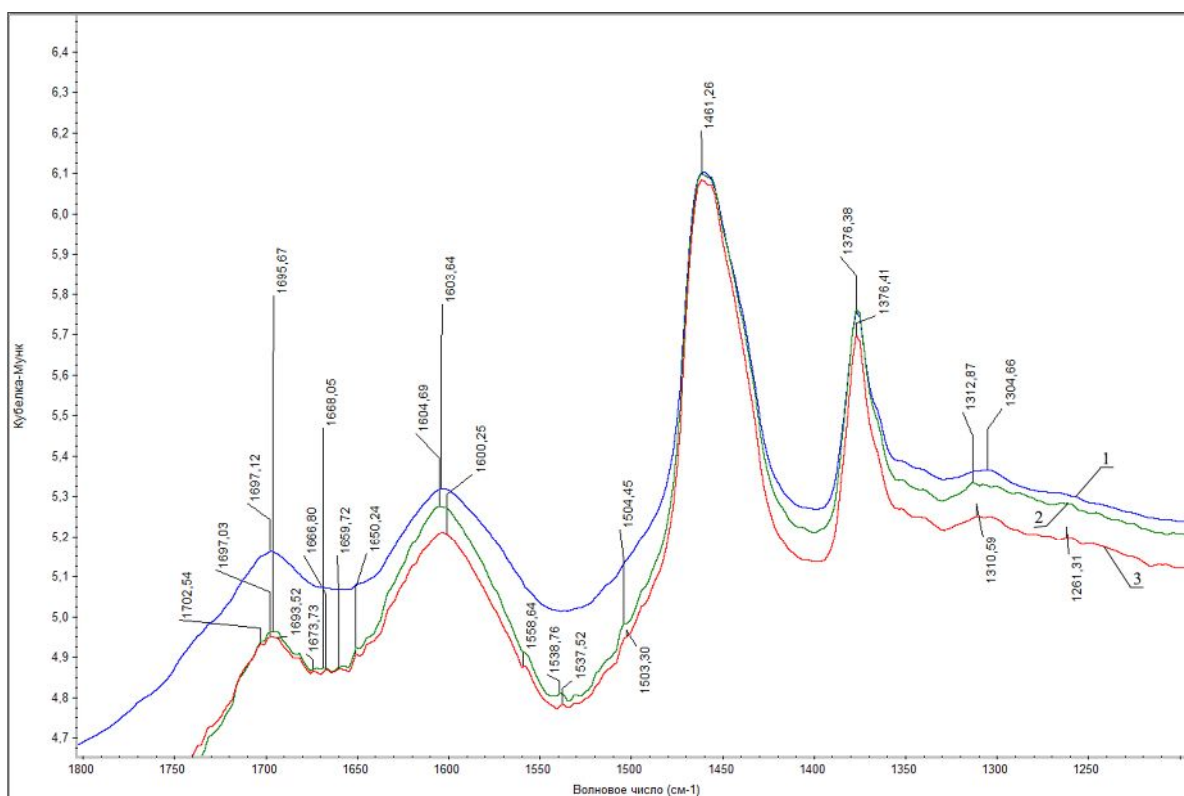
При расшифровке полученных ИК-спектров на рис. 1, установлено, что в области $4000 - 400 \text{ см}^{-1}$, за исключением пиков, входящих в интервалы от 1700 до 1500 см^{-1} , от 1000 до 500 см^{-1} , присутствуют характерные для битумов интенсивные полосы в области 2852 и 2921 см^{-1} (валентные колебания СН в группах CH_2 , свидетельствующие о значительном количестве предельных углеводородов, битумов, парафинов, масел [13-15]. Анализ приведенных спектров указывает на повышенное содержание в модифицированном битуме высокомолекулярных асфальтенов с некоторым увеличением структурирующих смол.

Поэтому для идентификации ИК спектров битума БНД 90/130, битума БНД 90/130 + «Viator 66» и битума БНД 90/130 + КСД была выбрана область «отпечатков пальцев» $1800 - 400 \text{ см}^{-1}$, так как основные отличительные особенности расположения пиков поглощения, их относительная интенсивность находятся в данном интервале. Для удобства идентификации полос поглощения эта область была разбита на два интервала от 1800 до 1200 см^{-1} (рис. 2а) и от 1200 до 600 см^{-1}

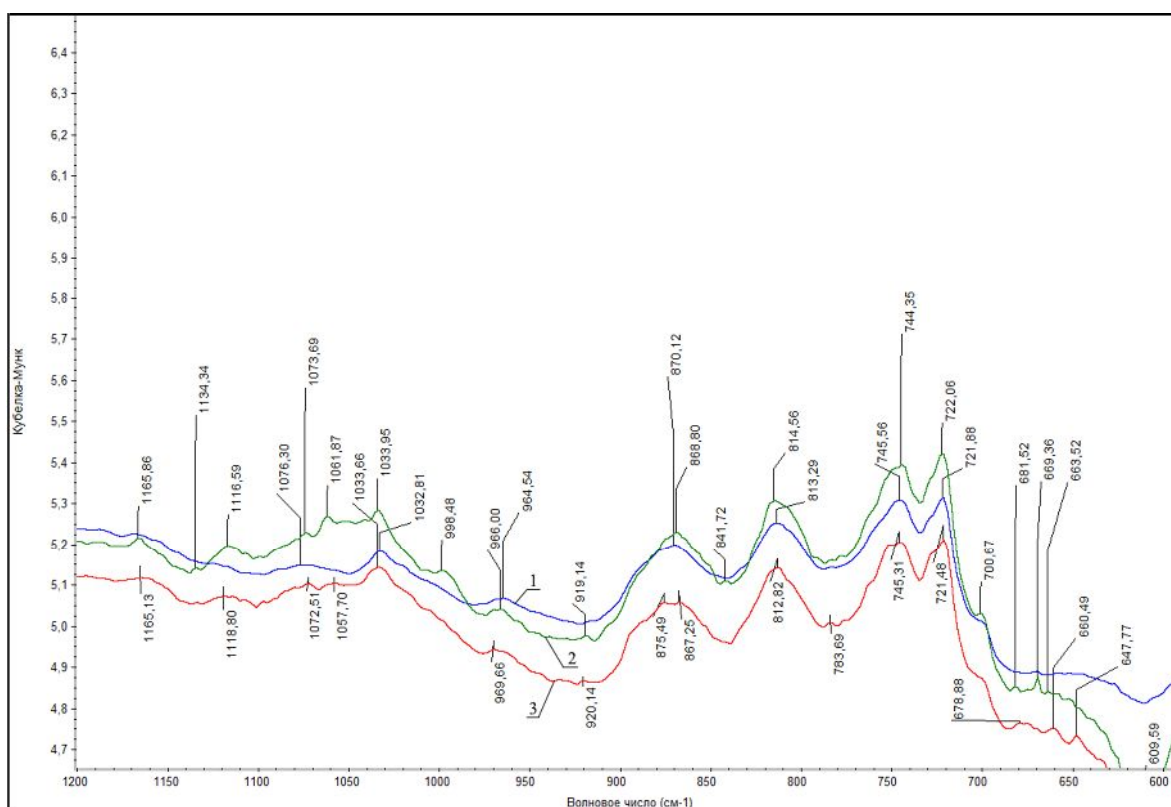
(рис. 2б).

Отличительные признаки ИК-спектров образцов битума БНД 90/130, битума БНД 90/130 + «Viator 66» и битума БНД 90/130 + КСД в области «отпечатков пальцев» приведены в табл. 1.

Анализ полученных данных (рис. 2а) позволил установить, что в области поглощения от 1750 до 1640 см^{-1} имеются отличия по распределению пиков поглощения и их относительной интенсивности во всех образцах. В данной области у образца № 1 имеются полосы поглощения $1697,12 \text{ см}^{-1}$ и $1603,64 \text{ см}^{-1}$, $1304,66 \text{ см}^{-1}$. У образца № 2 отмечаются полосы поглощения $1695,67 \text{ см}^{-1}$ и $1668,05 \text{ см}^{-1}$, $1312,87 \text{ см}^{-1}$ с некоторым смещением от образца № 1, а также дополнительные полосы поглощения $1538,76 \text{ см}^{-1}$ и $1504,45 \text{ см}^{-1}$ характерные для «Viator 66». У образца № 3 имеются полосы поглощения $1697,03 \text{ см}^{-1}$, $1600,25 \text{ см}^{-1}$, $1310,59 \text{ см}^{-1}$ с некоторым смещением от образца № 1, а также дополнительные полосы поглощения, характерные для КСД $1702,54 \text{ см}^{-1}$, $1673,73 \text{ см}^{-1}$, $1659,72 \text{ см}^{-1}$, $1650,24 \text{ см}^{-1}$, $1558,64 \text{ см}^{-1}$, $1537,52 \text{ см}^{-1}$, $1503,3 \text{ см}^{-1}$, $1261,31 \text{ см}^{-1}$.



а



б

Рис. 2. ИК спектры: №1 Битум БНД 90/130; №2 Битум БНД 90/130 + «Viator 66»; №3 Битум БНД 90/130 + КСД.
а) области поглощения спектров 1800 – 1200 см⁻¹, б) области поглощения спектров 1200 – 600 см⁻¹

Таблица 1

Отличительные признаки ИК-спектров полос поглощения образцов № 1-3

№ п/п	Полосы поглощения	Структурные фрагменты	Волновые числа, см ⁻¹
1	Для кетонов	α , β непредельные C=C-CO	1695–1660
		арилалкилкетоны Ar-CO-Alk	1700–1680
		диарилкетоны Ar-CO-Ar	1170–1660
		β -Дикетоны Енольная форма -CO-C=C-OH	1640–1535
2	Для карбоновых кислот	Кислоты с Н-связями	1680–1650
		Карбоксилатанионы	1650–1550
3	Для сложных эфиров	-COH=CHCOOR	1655–1635
4	Для альдегидов	α , β , - непредельные C=C-CHO	1705–1685
		Сопряженные полиеновые C=C-C=C	1680–1660
		Ароматические	1715–1695
5	Для ароматических соединений	Монозамещенные	770–730, 710–690
		1,2-замещенные	770–735
		1,4- и 1,2,3,4- замещенные	860–800
		1,2,3 замещенные	800–770, 720–685
6	Для серосодержащих функциональных групп	S=O st	1225–980
		R-SO-R	1060–1015
		R-SO-OH	~1100
		R-SO ₂ -R	1170–1110
		C=S st	1100–1020, 1070–1000
7	Для других колебаний, связанных с группой C-O-H	R-O-H	750–650

В области 1200–600 см⁻¹ присутствуют полосы поглощения, характерные для ароматических соединений, внеплоскостные деформационные колебания C-H в области 1000–650 см⁻¹:

В области 1200–400 см⁻¹ для образца № 1 имеются следующие характерные полосы поглощения: 1032,81 см⁻¹, 964,54 см⁻¹, 870,12 см⁻¹, 814,56 см⁻¹, 744,35 см⁻¹, 722,06 см⁻¹. У образца № 2 имеются полосы поглощения, характерные для битумов в области 1032,81 см⁻¹, 964,54 см⁻¹, 870,12 см⁻¹, 813,29 см⁻¹, 745,56 см⁻¹, 721,88 см⁻¹, а

также дополнительные полосы поглощения, характерные для «Viatop 66» - 1076,30 см⁻¹. У образца № 3 имеются полосы поглощения, характерные для битумов в области 1033,66 см⁻¹, 969,66 см⁻¹, 867,25 см⁻¹, 812,82 см⁻¹, 745,31 см⁻¹, 721,48 см⁻¹, а также имеются дополнительные полосы поглощения: 1165,13 см⁻¹, 1180,80 см⁻¹, 1072,51 см⁻¹, 1057,70 см⁻¹, 920,14 см⁻¹, 875,49 см⁻¹, 783,69 см⁻¹, 678,88 см⁻¹, 660,49 см⁻¹, 647,77 см⁻¹. Для удобства сравнения полос поглощения результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характерные и дополнительные полосы поглощения в образцах № 1-3

№ п/п	Область поглощения, см ⁻¹	Образцы	Характерные полосы поглощения, см ⁻¹	Дополнительные полосы поглощения, см ⁻¹
1	1800–1200	Битум БНД 90/130	1697,12; 1603,64; 1304,66	–
		Битум БНД 90/130 + «Viatop 66»	1695,67; 1668,05; 1312,87	1538,76; 1504,45
		Битум БНД 90/130 + КСД	1697,03; 1600,25; 1310,59	1702,54; 1673,73; 1659,72; 1650,24; 1558,64; 1537,52; 1503,3; 1261,31
2	1200–600	Битум БНД 90/130	1032,81; 964,54; 870,12; 814,56; 744,35; 722,06	-
		Битум БНД 90/130 + «Viatop 66»	1032,81; 964,54; 870,12; 813,29; 745,56; 721,88	1076,30
		Битум БНД 90/130 + КСД	1033,66; 969,66; 867,25; 812,82; 745,31; 721,48	1165,13; 1180,80; 1072,51; 1057,70; 920,14; 875,49; 783,69; 678,88; 660,49; 647,77

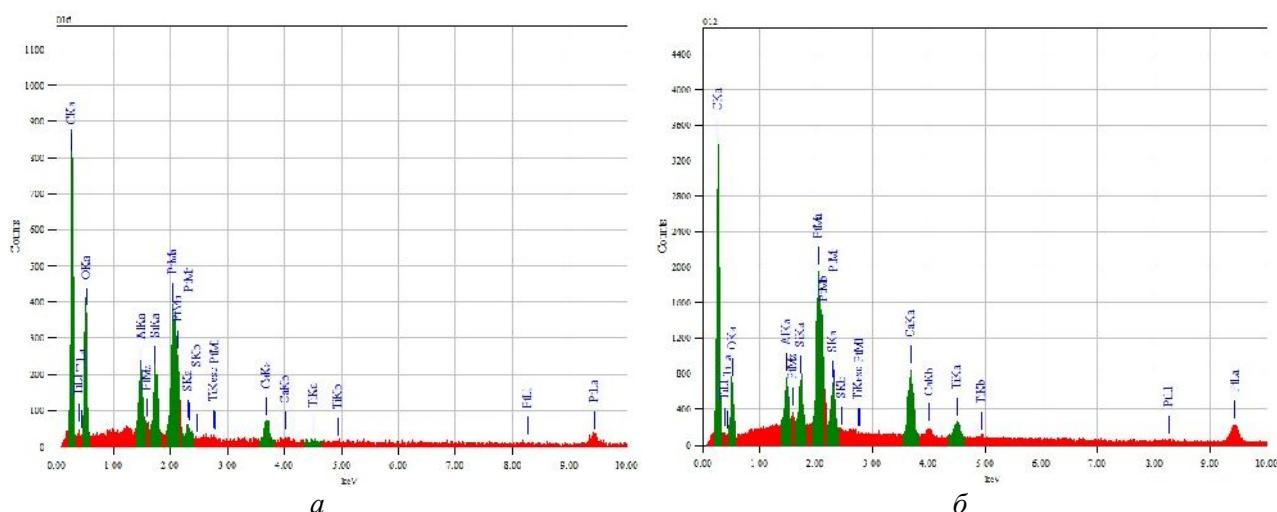


Рис. 3. Рентгеноспектральный анализ. а – волокно СД «Viatop 66», б – волокно КСД

Таким образом, в образцах № 2 и № 3 дополнительно, в отличие от образца № 1, появились полосы поглощения характерные для ароматических соединений C=H группа, серосодержащих функциональных групп S=O st, R-SO-R, R-SO-OH, R-SO₂-R, C=S st а также для групп C-O-H. Также установлено, что в битуме с КСД происходит большое образование сероорганических соединений (табл. 2). Таким образом, можно предположить, что данное увеличение вызвано наличием в составе КСД резинового порошка, который при взаимодействии с битумом образует химические связи, представленные в табл. 1.

Для подтверждения данной гипотезы были проведены исследования волокон стабилизирующих добавок «Viatop 66» и КСД методом рентгеноспектрального анализа. Результаты исследования приведены на рис. 3. Полученные данные, в

результате исследования химического состава «Viatop 66» и КСД методом рентгеноспектрального анализа, согласуются с результатами, полученными методом инфракрасной спектроскопии на наличие серосодержащих соединений. Острота пиков на рис. 3а и рис. 3б характеризует наличие химических элементов в составе добавок. Таким образом, установлено, что в КСД по сравнению с «Viatop 66» значительно преобладает сера (S).

Для определения влияния и зависимостей стабилизирующих добавок «Viatop 66» и КСД на структурно-механические свойства битума до и после кратковременного старения применялись стандартные методы исследования, описанные в ГОСТ 22245-90, 11505-75, 11506-73, 11501-78, 33140-2014. Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

Структурно-механические свойства битума с добавками до и после кратковременного старения

Вид добавки в битуме	Глубина проникания иглы, мм		Растяжимость, см		Температура размягчения, °С		Температура хрупкости, °С	
	Старение		Старение		Старение		Старение	
	до	после	до	после	до	после	до	после
Битум БНД 90/130	121	118	98	92	45,1	42,1	-25,0	-22,7
Битум БНД 90/130 + 0,4 % КСД	96	93	74	71	46,5	44,8	-27,4	-30,3
Битум БНД 90/130 + 0,4 % Viatop 66	91	86	71	67	49,0	47,6	-26,5	-25,7

Установлено, что после кратковременного старения в битуме с КСД расширяется интервал пластичности с 73,3 до 75,1. Полученные данные коррелируются с результатами пенетрации и растяжимости битума, где на 7,5 % выше глубина проникания иглы и на 5,6 % растяжимость, в сравнении с битумом, содержащем добавку «Viatop 66». Рациональное сочетание компонентов добавки приводит к образованию сероорга-

нических соединений, набуханию волокон, повышению эластичности системы и устойчивости к старению, обеспечивая повышение прочности асфальтобетона и снижение чувствительности к температурным воздействиям, предотвращая образование микротрещин. Таким образом, можно утверждать, что сочетание целлюлозного волокна и резинового порошка модифицирует битум, увеличивая его реологические свойства.

Изучение физико-механических характеристик щебеночно-мастичного асфальтобетона с добавками «Viator 66» и КСД выполнялось стандартными методами по ГОСТ 12801-98 и 31015-

2002 путём испытания образцов-цилиндров в возрасте 1 суток. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства ЦМА с добавками «Viator 66» и КСД

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ 31015-2002	Свойства ЦМА с добавкой	
			Viator 66	КСД
Предел прочности при сжатии при температуре, 0 °С	МПа	-	8,42	7,64
Предел прочности при сжатии при температуре, 20 °С	МПа	не менее 2,2	2,5	2,9
Предел прочности при сжатии при температуре, 50 °С	МПа	не менее 0,65	1,5	1,7
Предел прочности на растяжение при расколе, 0 °С	МПа	не менее 2,5 не более 6,0	3,2	3,3
Водонасыщение	%	от 1,0 до 4,0	1,8	1,6
Стекание органического вяжущего	%	не более 0,2	0,14	0,12
Коэффициент внутреннего трения		не менее 0,93	0,94	0,95
Сцепление при сдвиге		не менее 0,18	0,28	0,31

Установлено, что введение КСД в ЦМА приводит к увеличению физико-механических свойств асфальтобетона по сравнению с «Viator 66»: на 13 % повышается прочность при 20 °С; на 10 % прочность при 50 °С; на 10 % увеличивается сцепление при сдвиге; на 25 % снижается стекание вяжущего. Увеличение прочностных характеристик ЦМА обусловлено наличием резинового порошка в дисперсной среде асфальтобетона, который образует дополнительные эластичные центры, адсорбирующие и удерживающие битум в межзерновом пространстве ЦМА.

Выводы. При введении КСД в битум образуются полосы поглощения различной интенсивности (1165,13 см⁻¹; 1180,80 см⁻¹; 1072,51 см⁻¹; 1057,70 см⁻¹; 920,14 см⁻¹; 875,49 см⁻¹; 783,69 см⁻¹; 678,88 см⁻¹; 660,49 см⁻¹; 647,77 см⁻¹), характерные для данной добавки. Наличие такого количества полос обусловлено присутствием в составе КСД резинового порошка, который при взаимодействии с битумом образует ароматические и сероорганические соединения за счёт частичного растворения частиц резинового порошка в битуме.

Рентгеноспектральный микроанализ подтверждает данные ИК-Фурье спектроскопии на предмет наличия сероорганических соединений в битуме с добавкой КСД.

Введение стабилизирующих добавок в битум приводит к образованию дополнительных химических связей, что улучшает качество битума и щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Установлено, что при введении КСД в битум происходят изменения структурно-механических свойств битума: вязкость повышается на 21,2 %, температура размягчения повышается на 6 %, температуры хрупкости снижении на 10 %, расширяется интервал пластичности вяжущего на 13,7 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костин В.И. Щебеночно-мастичный асфальтобетон для дорожных покрытий // Нижний Новгород: НГАСУ. 2009. 67 с.
2. Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона. М.: ООО «Издательство "Элит"». 2009. 176 с.
3. Мухаметханов А.М., Нугманов О.К., Гаврилов В.И. Способ получения стабилизирующей добавки для щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 6. С. 204–210.
4. Ястремский Д.А., Абайдуллина Т.Н., Пахомов И.А. Изучение влияния вида и типа стабилизирующих добавок в ЦМА смесях // Сборник материалов XV научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов, соискателей и магистрантов ТюмГАСУ. Т.1. Тюмень: РИО ТюмГАСУ. 2015 г. С. 213–218.
5. Ястремский Д.А., Чепур П.В., Абайдуллина Т.Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния дорожного покрытия из ЦМА с применением стабилизирующей добавки «Армидон» // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 277–281.
6. Superpave Mixes. Asphalt concrete Institute of Superpave series No. 2 (SP-2), printing house. 1996. 117 p.
7. Herren K.H., Erhard H., Hoggenmuller F., Kast O. Splittmastixasphalt // LEITFADEN. Deutscher Asphaltverband (DAV). 27 p.
8. Emery J., Woodman C., Burlie R. Stone Mastic Asphalt Technology for Urban Pavements. // XIII IRF World Meeting, Toronto, Ontario, Canada. 1997.
9. NAPA (National Asphalt Pavement Association) Designing and Constructing SMA Mixtures -

State of the Practice. QIP 122. 1999.

10. Louay N. Mahammad., Zheng Z. Tan., Baoshan Huang. Fundamental Properties of SMA and CMHB Mixes // Proceedings BCRA'98, Norway. 1998.

11. Васильев А.В., Гриненко Е.В., Шукин А.О., Федулина Т.Г. Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений: Учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА. 2007. 54 с.

12. Анисимова Н.А. Идентификация органических соединений: учебное пособие // Горно-Алтайск: РИО ГАГУ. 2009. 95 с.

13. Абдрафикова И.М., Каюкова Г.П., Вандюкова И.И. Исследование состава асфальтенов

и продуктов их фракционирования методом ИК Фурье спектроскопии // Вестник Казанского технологического института. 2011. №49. С. 179–183.

14. Гладких, В.А. Сeroасфальтобетон, модифицированный комплексной добавкой на основе серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов: дис... канд. техн. наук. М., 2016. 220 с.

15. Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Мурафа А.В., Фахрутдинова В.Х., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Исследование особенностей взаимодействия битумов с полимерами // Известия КазГАСУ. Казань. 2011. № 1 (15). С. 140–145.

Информация об авторах

Ястремский Дмитрий Андреевич, специалист кафедры строительных материалы. E-mail: yaster.dmitry@yandex.ru. Тюменский индустриальный университет. Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Поступила 12.03.2020 г.

© Ястремский Д.А., 2020

Yastremskiy D.A.

Tyumenskiy Industrialnyy Universitet

E-mail: yaster.dmitry@yandex.ru

RESEARCH OF BITUMINOUS BINDER WITH STABILIZING ADDITIVES BY INFRARED SPECTROSCOPY AND X-RAY SPECTRAL ANALYSIS

Abstract. Increasing the volume of crushed stone-mastic asphalt concrete used in the upper layers of road surfaces requires the development of effective stabilizing additives that ensure the uniformity of the asphalt mixture during short-term storage and transportation, as well as improving the properties of asphalt concrete. This additives include a complex stabilizing additive of the following composition: 90 % cellulose fibers from waste paper, 5 % rubber powder, 5 % viscous petroleum bitumen of the BND 90/130 brand. This article presents the results of a study of bitumen with the addition of "Viatop 66" and a complex cellulose-containing stabilizing additive (CSD). Using Fourier-transform spectroscopy, graphical data are obtained. as a result of their analysis, it is found that the interaction of stabilizing additives for crushed-mastic asphalt concrete with bitumen leads to the appearance of additional absorption bands characteristic of aromatic compounds (CH, benzene ring), sulfur-containing functional groups S=O st, R-SO-R, R-SO-OH, R-SO₂-R, C=S st, as well as for C-O-H groups. X-ray spectral analysis confirmed the presence of additional sulfur-containing spectra in the composition of stabilizing additives. It is found that depending on the chemical composition of the stabilizing additives, the physical and mechanical characteristics of the bituminous binder and the resulting asphalt concrete change.

Keywords: asphalt concrete, crushed stone-mastic asphalt concrete, stabilizing additive, infrared spectroscopy, bitumen.

REFERENCES

1. Kostin V.I. Highways and aerodromes and listeners of system of additional professional education [Shchebenochno-mastichnyj asfal'tobeton dlya dorozhnyh pokrytij]. N. Novgorod: NNGASU. 2009, 65 p. (rus)

2. Kiryukhin G.N., Smirnov E.A. Coatings from crushed stone and mastic asphalt concrete [Pokrytiya iz shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona]. Elite Publishing house.

2009, 176 p. (rus)

3. Mukhametkhanov A.M., Nugmanov O.K., Gavrilov V.I. A method of obtaining a stabilizing additive for crushed stone and mastic asphalt mix [Sposob polucheniya stabiliziruyushchej dobavki dlya shchebenochno-mastichnoj asfal'tobetonnoj smesi]. Bulletin of Kazan Technological University. 2010. No. 6. Pp. 204–210. (rus)

4. Yastremsky D.A., Abaydullina T.N., Pakhomov I.A. Studying the influence of the type

and type of stabilizing additives in alkaline mixtures of mixtures [Izuchenie vliyaniya vida i tipa stabiliziruyushchih dobavok v SHCHMA smesyah] Collection of materials of the XV scientific-practical conference of young scientists, postgraduates, applicants and undergraduates TumGASU. 2015. Pp. 213–218. (rus)

5. Yastremsky D.A., Chepur P.V., Abaidullina T.N. Numerical modeling of the stress-strain state of the pavement made of alkali metal oxide using the stabilizing additive Armidon [Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dorozhnogo pokrytiya iz SHCHMA s primeneniem stabiliziruyushchej dobavki «Armidon»]. Fundamental research. 2016. No. 7–2. Pp. 277–281. (rus)

6. Superpave Mix Design. Asphalt Institute Superpave Series. No. 2 (SP-2), Printing. 1996. 117 p.

7. Herren K.H., Erhard H., Hoggenmuller F., Kast O. Splittmastixasphalt. LEITFADEN. Deutscher Asphaltverband (DAV). 27 p.

8. Emery J., Woodman C., Burlie R. Stone Mastic Asphalt Technology for Urban Pavements. XIII IRF World Meeting, Toronto, Ontario, Canada. 1997.

9. NAPA (National Asphalt Pavement Association) Designing and Constructing SMA Mixtures - State of the Practice. QIP 122. 1999.

10. Louay N. Mahammad., Zheng Z. Tan., Baoshan Huang. Fundamental Properties of SMA and CMHB Mixes. Proceedings BCRA'98, Norway.

1998.

11. Vasiliev A.V., Grinenko E.V., Schukin A.O., Fedulina T.G. Infrared Spectroscopy of Organic and Natural Compounds [Infrakrasnaya spektroskopiya organicheskikh i prirodnykh soedinenij]. SPb.: SPbGLTA. 2007. 54 p. (rus)

12. Anisimova N.A. Identification of organic compounds: a training manual [Identifikaciya organicheskikh soedinenij]. Gorno-Altaysk: RIO GAGU. 2009. 95 p. (rus)

13. Abdrafikova I.M., Kayukova G.P., Vandyukova I.I. Investigation of the composition of asphaltenes and products of their fractionation by IR Fourier spectroscopy [Issledovanie sostava asfal'tenov i produktov ih frakcionirovaniya metodom IK Fur'e spektroskopii]. Bulletin of the Kazan technological Institute. 2011. No. 49. Pp. 179–183. (rus)

14. Gladkikh V.A. Seroasfaltobeton modified with a complex additive based on sulfur and neutralizers of toxic gas emissions [Seroasfal'tobeton, modifitsirovannyj kompleksnoj dobavkoj na osnove sery i nejtralizatorov emissii toksichnykh gazov]. dis ... kand. doctor of technical Sciences. Moscow. 2016. 220 p. (rus)

15. Ayupova D.A. Potapova L.I. Muraf A.V., Fakhrutdinova V.Kh., Khakimullin Yu.N., Host G. Study species interactions of bitumen with polymers [Issledovanie osobennostej vzaimodejstviya bitumov s polimerami]. Proceedings of the University. Kazan. 2011. No. 1 (15). Pp. 140–145. (rus)

Information about the authors

Yastremsky, Dmitry A. Specialist of the building materials department. E-mail: yaster.dmitry@yandex.ru. Tyumen Industrial University. Russia, 625000, Tyumen, ul. Volodarsky, 38.

Received 12.03.2020

Для цитирования:

Ястремский Д.А. Исследование битумного вяжущего со стабилизирующими добавками методами инфракрасной спектроскопии и рентгеноспектрального анализа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 24–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-24-31

For citation:

Yastremskiy D.A. Research of bituminous binder with stabilizing additives by infrared spectroscopy and x-ray spectral analysis. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 24–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-24-31

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-32-40

**Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Ахмед А.А.А., Лесовик Г.А.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
E-mail: walboali@yahoo.com

ПЕРЕРАБОТАННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ОТХОД КАК БЕТОННЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ УСТОЙЧИВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В данной работе было проведено экспериментальное исследование, с целью сравнения свойств заполнителя из бетонных отходов, образующихся при сносе, бетонных лабораторных отходов и природных заполнителей – которые использовались в качестве контрольных образцов. В ходе исследования изучается возможность использования отходов сноса для разработки строительных материалов со стабильными свойствами, с целью получения экономической выгоды от утилизации техногенных отходов. Первоначально получение заполнителей из отходов производилось путем дробления бетонного лома из отходов сноса и лабораторных отходов, с последующим исследованием их физических и химических свойств для получения заполнителей и бетонных смесей, изготовлением образцов, определением прочности на сжатие, изгиб и разрыв. Между результатами, полученными из различных экспериментов, была проанализирована корреляционная зависимость и отмечена линейная корреляция между прочностью на сжатие и другими установленными механическими свойствами. Представлена возможность утилизации строительных отходов, ведущая к решению нескольких проблем: снижение стоимости переработки промышленных отходов и повышение физико-механических свойств бетона, за счет введения их в качестве заполнителя.

Ключевые слова: бетонные отходы сноса, бетонные лабораторные отходы, природные заполнители, бетонный лом, утилизация отходов.

Введение. Строительная индустрия представляет собой важную отрасль, назначением которой является ввод в действие новых конструктивных решений, формирующих искусственную среду обитания человека, способствующую повышению уровня его жизнедеятельности. В этом смысле окружающую природную среду рассматривают в аспекте защиты зданий, сооружений и функционирующего в них человека от негативных и агрессивных воздействий внешних факторов среды. Процесс агрессивного взаимодействия строительной деятельности человека и окружающей среды на природу в полной мере стал предметом рассмотрения сравнительно недавно [1]. Между тем, строительство – один из сильнейших факторов антропогенного воздействия на природу, в том числе и на человека – неотъемлемой части природы. Антропогенное воздействие строительства на природную среду разнообразно по своему характеру и происходит на всех этапах строительной деятельности, начиная от добычи и производства строительных материалов и конструкций до переработки и повторного использования строительных отходов от сноса зданий и сооружений [2, 3].

После сноса старых дорог и зданий, тонны строительного мусора выбрасываются, разрушенный бетон также часто считается бесполезным и утилизируется как отходы сноса [4]. Главной задачей ученых всего мира является создание комфортной среды обитания человека или опти-

мизация системы «человек-материал-среда обитания» [5]. Однако большая часть строительных отходов считается инертной и потенциально может использоваться в качестве сырья для получения строительных материалов.

Природные ресурсы, как правило, потребляются в строительном секторе в значительных количествах, также образуется значительное количество отходов строительства и сноса, составляющих самый большой объем всех твердых отходов [6].

Огромное количество строительных отходов в разных странах выявило важность действий стран по управлению, переработке и повторному использованию отходов, образующихся в течение всего жизненного цикла конкретной инфраструктуры [6].

Образование строительных отходов и нерациональное использование истощающихся природных ресурсов для строительных материалов также связаны с неблагоприятным воздействием строительной промышленности на окружающую среду. По оценкам, в глобальном масштабе примерно 10–30 % отходов, размещаемых на свалках, образуются в результате строительных работ и работ по сносу [7].

Кроме того, чрезмерное использование природных ресурсов для производства щебня и гравия, становится все более серьезной экологической проблемой, для решения которой необходима разработка устойчивых комплексных про-

грамм управления и подходящих процессов переработки, что позволит получить экономическую отдачу от этих отходов. Увеличение объемов переработки и повторного использования отходов сноса и строительства внутри отрасли поможет сохранить истощающиеся природные ресурсы [8].

Благодаря разработке эффективных строительных материалов и обязательных правил утилизации отходов сноса и строительства, экологические цели могут быть достигнуты, так как существует большая потребность в разработке подходящих процессов утилизации для защиты окружающей среды, а также для получения экономической отдачи от отходов.

Во многих частях мира растет интерес к переработке и повторному использованию отходов строительной отрасли, так, в Нидерландах самый высокий уровень переработки строительных отходов – 93 %, за ним следует Турция, где эффективное управление отходами позволило использовать почти 90 % отходов сноса и строительства [9]. Австралия достигла 87 % переработки отходов сноса и строительства [10], а затем Дания – 82 % [11] и Германия – 18 % [12].

Общие объемы использования отходов сноса и строительства для Англии в 2008 году оценивались в 86,9 млн. тонн, из которых 53 миллиона тонн были переработаны и еще 11 миллионов тонн были распределены на свободных

участках для мелиорации земель, улучшения сельского хозяйства или инфраструктурных проектов [13].

Повторное использование и переработка бетонных отходов, которые составляют наибольшую долю отходов сноса и строительства, предлагается как решение проблемы утилизации отходов и сохранения природных ресурсов, в то время как 40 % используемых в мире щебня, гальки и песка, применяются в строительной отрасли, количество материалов надлежащего качества постоянно снижается [14].

Кроме того, члены Европейского Союза производят около 50 миллионов тонн бетонных отходов каждый год, по сравнению с 60 миллионами тонн в США и 10–12 миллионами тонн в Японии, которая сократила использование заполнителей на 2,5 млн. м³ путем утилизации бетонных отходов в производство готовых бетонных смесей [15].

Методика и применяемые материалы

– Характеристики вяжущего

В данной работе в качестве вяжущего использовался цемент марки СЕМ I 42,5Н (ГОСТ 10178-85, ГОСТ 30515-2013) производства ЗАО Белгородский цемент. Физико-механические характеристики цемента определялись в соответствии с ГОСТ 30744-2001 (табл. 1).

Таблица 1

Свойства Белгородского портландцемента СЕМ I 42,5Н

Белгородский портландцемент СЕМ I 42,5Н		
Строительно-технические свойства цемента		
Показатели	Значение	Нормируемое ГОСТ
Удельная поверхность, м ² /кг	330	Не нормируется
Сроки схватывания,		
Начало, ч.	2,5 ч	Не ранее 2,00
Конец, ч.	3,35 ч	Не позднее 10,00
Предел прочности при сжатии цементного раствора. МПа в возрасте:		
3 сут.		
-изгиб	5,8	Не нормируется
-сжатие	33,00	Не нормируется
7 сут.		
-изгиб	-	-
-сжатие	-	-
28 сут.		
-изгиб	8,1	Не менее 5,9
-сжатие	56,6	Не менее 49
Тонкость помола, остаток на сите 0,008, %	7,00	Не менее 85
Нормальная густота цементного теста, %	25,5	Не нормируется
Содержание оксида серы So ₃ , %	2,42	Не менее 1,00 Не более 3,5
Содержание хлорид-иона Cl, %	0,002	Не более 0,1
C ₄ AF	13,1	не нормируется

Цементы испытывались в соответствии с требованиями действующих стандартов. Применявшийся цемент полностью отвечает предъявляемым к нему требованиям. При этом следует отметить, что данный цемент показывает высокий предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, значительно превышающий требуемый уровень.

– Характеристика мелкого и крупного заполнителя

В качестве мелкого заполнителя для бетона

применяли кварцевые пески (месторождения Графовское) с модулем крупности $M_{кр}=1,01$, насыпной плотностью в неуплотненном состоянии $\rho_{н(неуп)}=1495 \text{ кг/м}^3$, в уплотненном состоянии $\rho_{н(упл)}=1570 \text{ кг/м}^3$, истинной плотностью $\rho_{ист}=2640 \text{ кг/м}^3$, пустотностью по ГОСТ 8735-88 – 43,4 %, водопотребностью – 5,5 %, цементопотребностью – 0,530. Пески должны удовлетворять требованиям ГОСТ 8736-93, качество песка оценивается зерновым составом, модулем крупности и химическим составом (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Химический состав мелкого заполнителя

Месторождения	Содержание, масс. %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O	п.п.п
Графовское	96,8	0,5	0,9	0,38	0,98	0,44

Таблица 3

Гранулометрический состав мелкого заполнителя

Месторождения	Размер ячеек сита, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	M _{кр}
Графовское	Полный остаток, %	0,7	1,3	4,6	19,4	75,4	1,01

Крупный заполнитель должен удовлетворять требованиям ГОСТ 8269.0-97 по прочности, объемной насыпной массе, зерновому составу, морозостойкости, суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

В таблице 4 представлен химический состав бетонного лома из разрушенных зданий, который состоит из SiO₂ (52,5 %), CaO (31,4 %), Al₂O₃ (6,48 %), Fe₂O₃ (4,05 %), MgO (1,93 %), SO₃ (0,947 %), Na₂ (0,927 %), K₂O (0,913 %). На рис. 1 показана микроструктура и химический состав

бетонного лома где, (а) - фото бетонного лома, характеризующее состав и контактные зоны между цементным раствором и крупным заполнителем бетонного лома, (б) – карта химического состава бетонного лома, (с) – присутствующие химические элементы O (55,5 %), Si (21,9 %), Ca (19,5 %), Al (1,6 %), S (1,2 %) и K (0,3 %).

В таблице 5 показан гранулометрический состав крупного заполнителя полученного из бетонного лома, соответствующий требованиям с ГОСТ 8267-93.

Таблица 4

Химический состав бетонного лома

Содержание, масс. %								
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂	K ₂ O	п.п.п
52,5	31,4	6,48	4,05	1,93	0,947	0,927	0,913	0,853

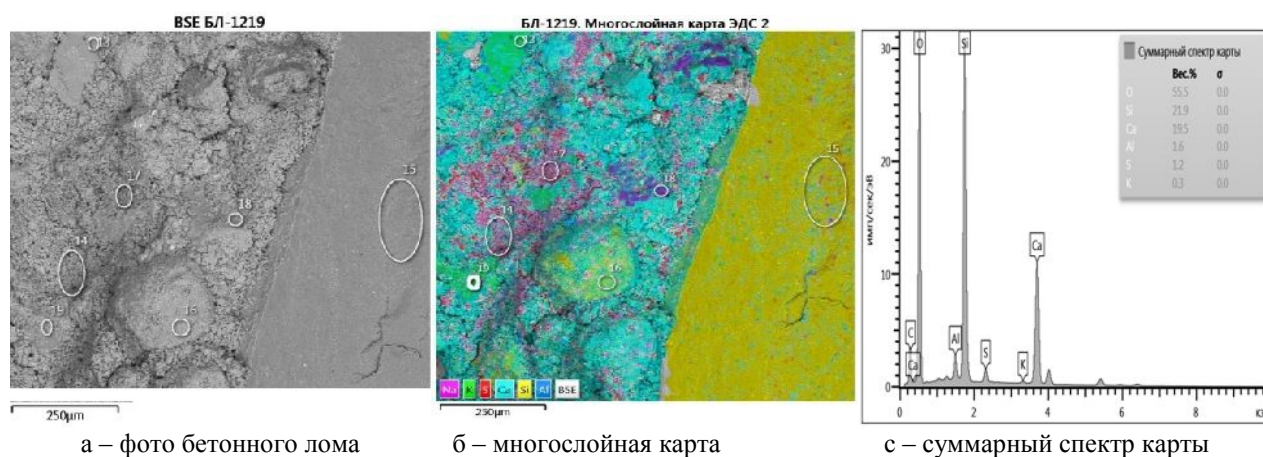


Рис. 1. Микроструктура и химический состав бетонного лома

Таблица 5

Гранулометрический состав фрагментов бетонного лома (крупного заполнителя)

№ п/п	Номера сит	Ед. измерения	Показатели		
			Частные остатки	Полные остатки	Нормативное значение по ГОСТ 8267-93
1	20	%	10	10	до 10 %
2	10		64	74	30–80 %
3	5		20	94	90–100 %
4	2,5		5	99	95–100 %

Химический состав лабораторных бетонных отходов (таблица 6) представлен SiO_2 (91,85 %), CaO (1,28 %), Al_2O_3 (3,98 %), Fe_2O_3 (0,626 %),

MgO (0,660 %), Na_2O (0,2 %), TiO_2 (0,623 %), K_2O (0,673 %).

Таблица 6

Химический состав лабораторных бетонных отходов

Содержание, масс. %								
SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	TiO_2	K_2O	п.п.п
91,85	1,28	3,98	0,626	0,660	0,200	0,623	0,673	0,108

Основная часть. Это исследование рассматривает тематические изыскания из двух разных источников, первого (С1) – где были рассмотрены фрагменты, полученные из разрушенных

при испытаниях бетонных образцов-кубов (лабораторные бетонные отходы), (рис. 2-б) и второго (С2) – с фрагментами разрушенных зданий и сооружений из Ирака (рис. 2-а).



а – фрагменты разрушенных зданий



б – лабораторные бетонные отходы

Рис. 2. Отходы строительства

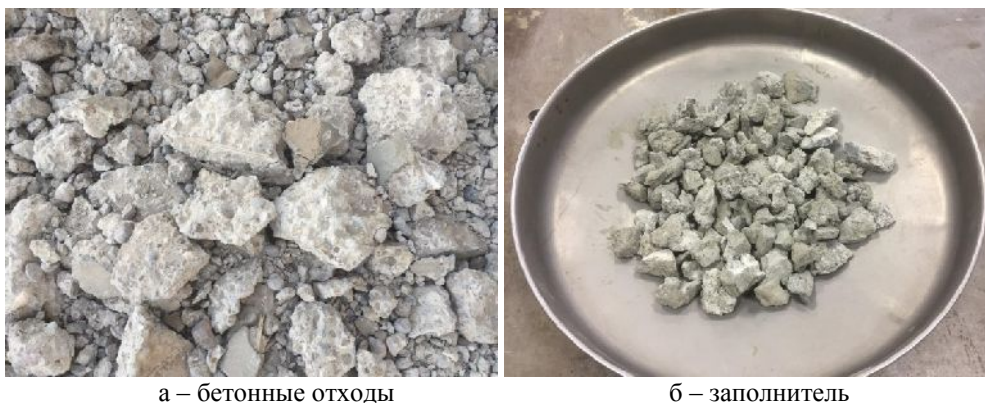
Было проведено экспериментальное исследование для сравнения свойств заполнителя, полученного из бетонных отходов различного происхождения: фрагментов разрушенных зданий и сооружений, лабораторных бетонных отходов и контрольного заполнителя из природных материалов.

После дробления бетонных отходов было рассчитано количество материала (рис. 3). Установлено, что из 100 кг разрушенных бетонных отходов можно получить 30 кг качественного заполнителя.

С целью изучения свойств заполнителя был проведен ситовой анализ, определены устойчивость к распаду крупного заполнителя, удельный вес, водопоглощение, насыпная плотность и пустотность.

На основе заполнителей, полученных из отходов и природного сырья, были изготовлены лабораторные образцы бетона класса по прочности В35 и определены их показатели по прочности при сжатии, растяжении и изгибе, после чего проведена корреляция между полученными результатами.

Полученные результаты показывают, что насыпная плотность испытанных лабораторных бетонных отходов была выше, чем в контрольном образце природного состава, тогда как количество пустот снижалось. Это связано с угловатостью частиц, поскольку использовалось дробление для создания однородного заполнителя размером 15 мм.



а – бетонные отходы

б – заполнитель

Рис. 3. Переработка строительных отходов в заполнители

Результаты и их обсуждение. Результаты (табл. 7) показывают, что удельный вес увеличивается с уменьшением водопоглощения. Удельный вес измельченного заполнителя ниже, чем у идентичного традиционного заполнителя, который обычно составляет около 2,2 %–2,5 % в условиях насыщенной сухой поверхности. Из-за цементного раствора, прикрепленного к частицам, водопоглощение переработанного заполнителя намного выше, чем у аналогичного первичного материала, который обычно составляет от 2 % до 6 % для крупного заполнителя. Результаты

подходят и попадают в приемлемый диапазон.

Возможная причина высокой скорости абсорбции испытанных в лабораторных бетонных отходах и бетонных отходах разрушенных зданий в более высоком водоцементном соотношении, используемом в смеси. Когда вода испаряется, она оставляет пустоты, которые занимают пространство в бетоне.

Результаты на рис. 4 показывают, что прочность при сжатии в возрасте 28 суток увеличивалась с уменьшением водоцементного отношения для всех смесей

Таблица 7

Физические свойства щебня

Показатели	Природный щебень	Щебень из лабораторных отходов	Щебень из отходов сноса зданий
Насыпная плотность, (кг/м ³)	1485	1478,3	1245,25
Удельный вес	2,630	2,527	2,520
Водопоглощение, %	2,3	2,74	11,2
Дробимость, %	28	26	35
Марка щебень	600	600	800
Пустотность, %	21	39	48.2

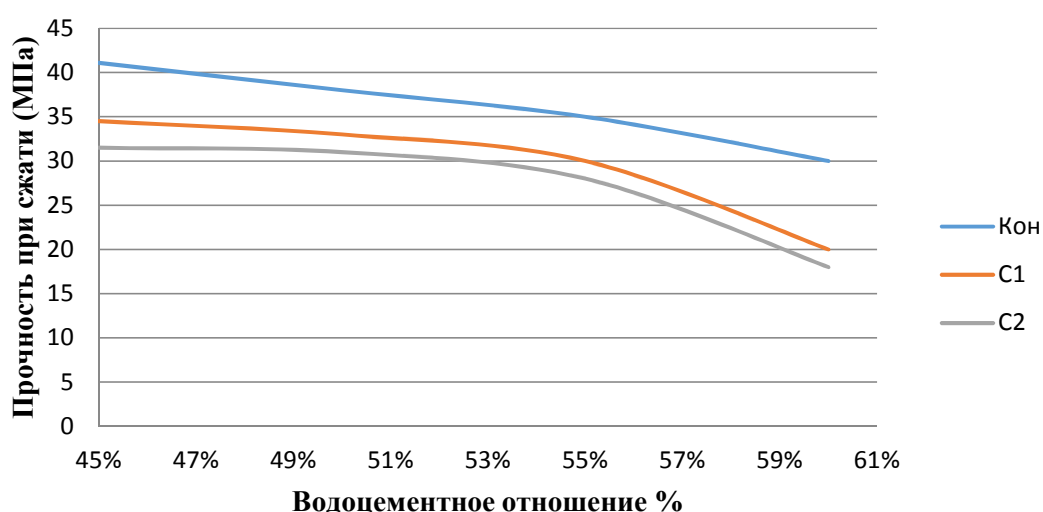


Рис. 4. Прочность и водоцементное отношение.

Были изготовлены три состава бетонных образцов с заполнителем из различных источников:

фрагменты разрушенных зданий и сооружений, лабораторные бетонные отходы из прошедших

лабораторные испытания образцов, и традиционный заполнитель, реализуемый на рынке строительных материалов, который использовался для подготовки контрольных образцов. Все образцы были разработаны с проектной прочностью на сжатие 35 МПа. Прочность на сжатие каждого образца и расход составляющих для бетонной смеси (Табл.8) была определена через 7, 14 и 28 суток.

Результаты показывают, что контрольные образцы превысили расчетную прочность 35 МПа. Самую высокую прочность имеют образцы, изготовленные из отходов испытанный в лаборатории образцов С1, на которых была достигнута расчетная прочность, тогда как образцы С2, изготовленные из случайных бетонных отходов, были немного ниже расчетной прочности.

Таблица 8

Расход составляющих для бетонной смеси и прочность при сжатии

Класс бетона	Ед. изм	Контрольная смесь	Смесь отходов (С1)	Смесь отходов (С2)
Цемент	кг/м ³	400	400	400
Щебень	кг/м ³	1023	-	-
Песок	кг/м ³	891	839	814
Щебень из отходов	кг/м ³	—	1075	1100
Вода	л/м ³	180 (45 %)	198 (50 %)	205(51 %)
Прочность при сжатии				
-3суток	МПа	33	28,2	18,3
-7суток	МПа	35,6	28,5	24,1
-28суток	МПа	41,1	34	31

При определении прочности при изгибе для сравнения был использован бетон, изготовленный с заполнителем испытанных в лаборатории бетонных отходов, бетон с отходами сноса и традиционно используемый заполнитель.

Три образца каждого состава были испытаны через 7, 14 и 28 суток (табл. 9). Прочность образцов бетона, изготовленных из традиционного заполнителя, как правило, была выше, чем у

образцов, изготовленных из заполнителя С1. Кроме того, прочность при изгибе образцов, изготовленных с использованием бетонных отходов из С1, также, как правило, немного выше, чем прочность образцов, изготовленных с заполнителем из С2.

Результаты (рис. 5.) показывают, что прочность при изгибе увеличивалась с увеличением прочности при сжатии для всей смеси.

Таблица 9

Средняя прочность при изгибе (МПа) в различном возрасте

Время твердения (суток)	Смесь отходов (С1)	Смесь отходов (С2)	Контрольная смесь
7	2,4	1,9	2,34
14	2,8	2,1	2,91
28	2,9	2,3	3,2

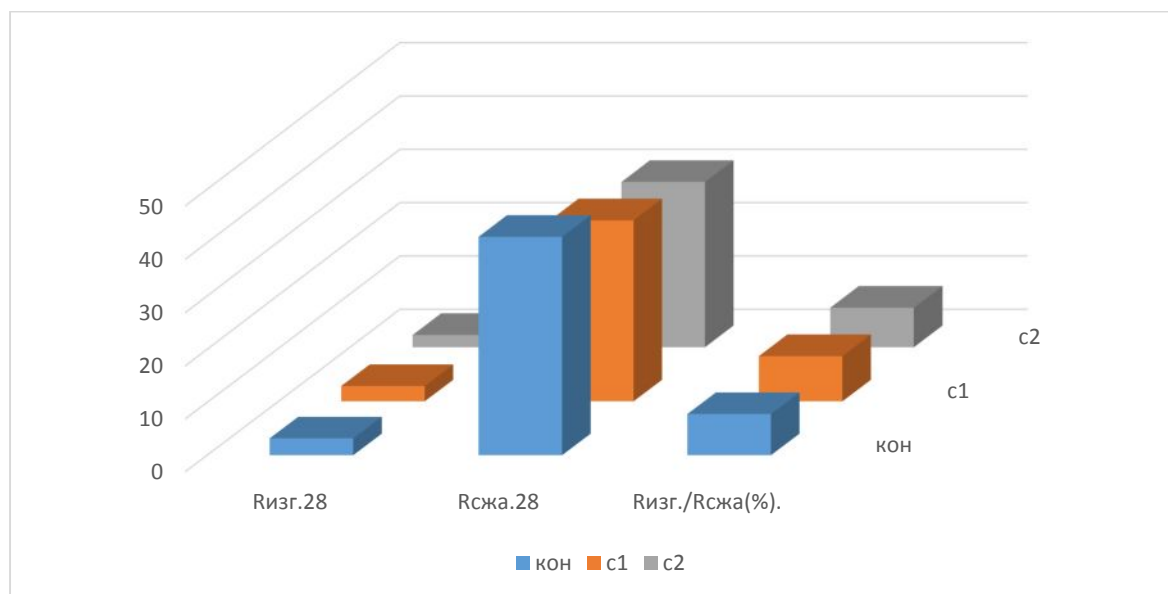


Рис. 5. Прочностные характеристики в зависимости от вида смеси

Выводы. Таким образом, изучена возможность утилизации строительных отходов, способствующая решению нескольких проблем: дешевой утилизации отходов и увеличению физико-механических свойств бетона, за счет введения переработанного отхода в качестве заполнителя. Исходя из изложенного материала, можно сделать следующие выводы:

- Объемная плотность (удельный вес) отходов для контрольного образца была выше, чем у С 1, тогда как количество пустот было меньше.
- Удельный вес измельченного переработанного заполнителя С2 был ниже, чем у обычного заполнителя, который обычно имеет значения от 2,2 до 2,5.
- Значение водопоглощения для переработанного заполнителя было намного выше, чем у обычного заполнителя, что объясняется присутствием цементного раствора, прикрепленного к частицам.
- При изучении прочности на сжатие было обнаружено, что контрольный образец имеет наибольшую прочность, со средним значением 41,1 МПа. Результаты также показывают, что средняя прочность на сжатие бетонных отходов С1 имеет самое высокое значение 34 МПа, что является весьма близким к расчетной прочности на сжатие 35 МПа, с увеличением прочности бетона на сжатие происходит также увеличение прочности на изгиб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 287 с.
2. Лесовик В.С., Потапов В.В., Алфимова Н.И., Ивашова О.В. Повышение эффективности работы с наномодификаторами // Строительные материалы. 2011. № 12. С. 60–62.
3. Lesovik V.S., Chulkova I.L., Zagordnyuk L.K., Volodchenko A.A., Yurievich P.D. The role of the law of affinity structures in the construction material science by performance of the restoration works // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No.12. Pp. 1100–1105.
4. Katrina Mc Neil, Thomas H.K. Kang. Recycled Concrete Aggregates: A Review // International Journal of Concrete Structures and Material. 2013. Vol. 7. No.1. Pp. 61–69. doi: 10.1007/s40069-013-0032-5.
5. Лесовик В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1994. № 7–8. С. 96–100.
6. Hakan Arslan, Nilay Coşgunand Burcu Salgın. Construction and Demolition Waste Management in Turkey. Waste Management - An Integrated Vision, Dr. Luis Fernando Marmolejo Rebellon (Ed.). 2012. InTech, doi: 10.5772/46110. Available from: <http://www.intechopen.com/books/waste-management-an-integrated-vision/construction-and-demolition-waste-management-inturkey>.
7. Fishbein B.K. Building for the future: strategies to reduce construction and demolition waste in municipal projects. 2010. Pp. 5–6. Available from: <http://www.informinc.org>.
8. Mills T.H., Showalter E, Jarman D.A. Cost Effective Waste Management Plan. Cost Engineering. 1999. Vol. 41 (3). Pp. 35–43.
9. Öztürk. M. İnşaat Yıkıntı Atıkları Yönetimi [In English: Construction Debris Management, Ministry of the Environment and Forestry]. Ankara. 2005. Pp. 12–15.
10. Construction Waste Recycling Exceeds Target. Pp. 2–3. <http://eied.deh.gov.au/minister/env/2000/mr22jun00.html>. (Accessed 2000 February 01)
11. European Commission, Directorate-General, Environment, Directorate E-Industry and Environment, ENV.E.3 - Waste Management, DGENV.E.3. Management of Construction and Demolition Waste. 2000. Working Document No.1. Pp. 3.
12. Corinaldesi V., Moriconi G. Reusing and Recycling C&D Waste in Europe. Construction Demolition Waste. Ed. M.C. Limbachiya, J.J. Roberts. USA. 2004. Pp. 62–65.
13. Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2010. 246 p. <http://www.defra.gov.uk/statistics/environment/waste/wrfg09-con-dem>. (Accessed 2012 April)
14. Ngowi A.B. Creating Competitive Advantage by Using Environment-Friendly Building Processes. Building and Environment. 2001. Vol. 36(3). Pp. 291–298.
15. Hansen T.C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry (Rilem Repot 6). Taylor & Francis Group London. New York, 1992. Pp. 14.

Информация об авторах

Лесовик Руслан Валерьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности. E-mail: ruslan_lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Аль-Бу-Али Уатик Саед Джассам, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: walboali@yahoo.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сопин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ахмед Ахмед Анис Ахмед, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: civileng85@yahoo.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Лесовик Галина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.09.2020 г.

© Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Ахмед А.А.А., 2020

**AlboAli W.S., Lesovik R.V., Sopin D.M., Ahmed A.A.A., Lesovik G.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: walboali@yahoo.com*

RECYCLED CONSTRUCTION WASTE AS A CONCRETE AGGREGATE FOR SUSTAINABLE BUILDING MATERIALS

Abstract. *In this work, an experimental study is conducted to compare the properties of aggregate from concrete waste generated during demolition, concrete laboratory waste and natural aggregates – which are used as control samples. The study examines the possibility of using demolition waste to develop building materials with stable properties, in order to obtain economic benefits from the disposal of man-made waste. Initially, the production of aggregates from waste is carried out by crushing concrete scrap from demolition waste and laboratory waste, followed by the study of their physical and chemical properties to obtain aggregates and concrete mixtures, the production of samples, and the determination of compressive, flexural and tensile strength. The correlation between the results obtained from various experiments is analyzed and a linear correlation between the compressive strength and other established mechanical properties is noted. The possibility of recycling construction waste, leading to the solution of several problems, is presented: reducing the cost of industrial waste disposal and improving the physical and mechanical properties of concrete by introducing it as a filler.*

Keywords: *concrete demolition waste, concrete laboratory waste, natural aggregates, concrete scrap, recycling.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonika (geomimetics) are examples of implementation in building materials science. [Geonika (geomimetika) primery realizacii v stroitel'nom materialovedenii]. pub.in Belgorod: BSTU. 2014. 287 p. (rus)
2. Lesovik V.S., Potapov V.V., Alfimova N.I., Ivashova O.V. Improving the efficiency of work with nanomodifiers [Povyshenie effektivnosti raboty s nanomodifikatorami]. Building materials. 2011. No 12. Pp. 60–62. (rus)
3. Lesovik V.S., Chulkova I.L., Zagordnyuk L.K., Volodchenko A.A., Yurievich P.D. The role of the law of affinity structures in the construction material science by performance of the restoration works. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No.12. Pp. 1100–1105.
4. Katrina Mc Neil, Thomas H.K. Kang. Recycled Concrete Aggregates: A Review. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2013. Vol. 7. No. 1. Pp. 61–69. doi: 10.1007/s40069-013-0032-5.
5. Lesovik V.S. Genetic principles of energy conservation in the building materials industry [Geneticheskie principy energosberezheniya v promyshlennosti stroitel'nykh materialov]. Proceedings of the higher educational institutions. Building. 1994. No. 7–8. Pp. 96–100. (rus)
6. Hakan Arslan, Nilay Coşgunand Burcu Salgın. Construction and Demolition Waste Management in Turkey. Waste Management - An Integrated Vision. Dr. Luis Fernando Marmolejo Rebellon (Ed.) Chapter: 14, Publisher: InTech. 2012. Pp. 313–332. doi: 10.5772/46110. Available from:

<http://www.intechopen.com/books/waste-management-an-integrated-vision/construction-and-demolition-waste-management-inturkey>.

7. Fishbein B.K. Building for the future: strategies to reduce construction and demolition waste in municipal projects. 2010. Pp. 5–6. Available from: <http://www.informinc.org>.

8. Mills T.H., Showalter E., Jarman D.A. Cost Effective Waste Management Plan. Cost Engineering. 1999. Vol. 41 (3). Pp. 35–43.

9. Öztürk. M. İnşaat Yıkıntı Atıkları Yönetimi [In English: Construction Debris Management, Ministry of the Environment and Forestry]. Ankara. 2005. Pp. 12–15.

10. Construction Waste Recycling Exceeds Target Pp. 2-3: <http://eied.deh.gov.au/minister/env/2000/mr22jun00.html>. (Accessed 2000 February 01)

11. European Commission, Directorate-General, Environment, Directorate E-Industry and Environment, ENV.E.3 – Waste Management,

DGENV.E.3. Management of Construction and Demolition Waste. 2000. Working Document. No. 1. Pp. 3.

12. Corinaldesi V., Moriconi G. Reusing and Recycling C&D Waste in Europe. Construction Demolition Waste. Ed. M.C. Limbachiya, J.J. Roberts. USA. 2004. Pp. 62–65.

13. Department for Environment, Food and Rural Affairs. 2010. 246 p. <http://www.defra.gov.uk/statistics/environment/waste/wrfg09-con-dem>. (Accessed 2012 April)

14. Ngowi A.B. Creating Competitive Advantage by Using Environment-Friendly Building Processes. Building and Environment. 2001. Vol. 36(3). Pp. 291–298.

15. Hansen T.C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry (Rilem Repot 6). Taylor & Francis Group London. New York. 1992. Pp. 14.

Information about the authors

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

Albo, Ali Wathiq S.J. Postgraduate student. E-mail: walboali@yahoo.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sopin, Dmitry M. PhD Associate Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Ahmed, Ahmed Anees A. Postgraduate student. E-mail: civileng85@yahoo.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Lesovik, Galina A. PhD, Assistant professor. E-mail: galina.lesovik@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.09.2020

Для цитирования:

Аль-Бу-Али У.С., Лесовик Р.В., Сопин Д.М., Ахмед А.А.А. Переработанный строительный отход как бетонный заполнитель для устойчивых строительных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-32-40

For citation:

AlboAli W.S., Lesovik R.V., Sopin D.M., Ahmed A.A.A. Recycled construction waste as a concrete aggregate for sustainable building materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 32–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-32-40

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-41-47

Блажнов А.А.

Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина

E-mail: blazhnov47@mail.ru

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БЛОЧНОЙ ТЕПЛИЦЫ ПОСТРОЕЧНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ФОРМ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ

Аннотация. Выращивание овощей в культивационных сооружениях позволяет значительно увеличить выход продукции по сравнению с открытым грунтом. Обобщены информационные данные по предлагаемым производителями для фермерских хозяйств теплицам. Определены основные типы фермерских теплиц, проведено их сравнение по возможным тепловым потерям в холодный период года. Установлено, что при равной площади застройки площадь ограждающих конструкций блочных (многопролётных) теплиц меньше, чем у однопролётных рамного и арочного типа. Выведена формула минимального коэффициента ограждения для блочной теплицы, при котором обеспечивается минимум энергетических затрат в отопительный период. Предложена конструктивная схема стального каркаса блочной теплицы построечного изготовления из прокатных профилей, позволяющая значительно снизить стоимость строительства сооружения по сравнению со стоимостными показателями теплиц заводской поставки. Получены зависимости расхода стали для конструктивных элементов каркаса в функции нагрузки и его строительных параметров. На основании полученных зависимостей установлены рациональные значения пролёта и шага стоек блочной теплицы для указанных в строительных нормах проектирования теплиц снеговых нагрузок. Для рациональных значений планировочных параметров культивационного сооружения приведены удельные показатели расхода стали и стоимости на каркас теплицы.

Ключевые слова: блочная теплица, стальной каркас, рациональные параметры каркаса.

Введение. Одним из видов производственной деятельности в малых формах хозяйствования является выращивание сельскохозяйственных культур в культивационных сооружениях. Для фермеров рынком предлагается несколько типов теплиц круглогодичного использования: однопролётные арочные, рамные и многопролётные (блочные) со стальным каркасом и ограждающими конструкциями из листового стекла и соевых поликарбонатных панелей (рис. 1) [1–15]. На уровне изобретений разработаны более слож-

ные конструкции теплиц [16–18], но их практическое применение нецелесообразно. Поставка и монтаж заводских теплиц требует значительных единовременных затрат: до 8–15 тыс. руб/м² в зависимости от конструктивного решения и инженерного оснащения [6, 12, 13], что в перспективе отрицательно повлияет на окупаемость сооружения и рентабельность производства в фермерском хозяйстве. Значительно снизить затраты на теплицу возможно при её строительстве собственными силами, используя для сварки стального каркаса прокатные профили.

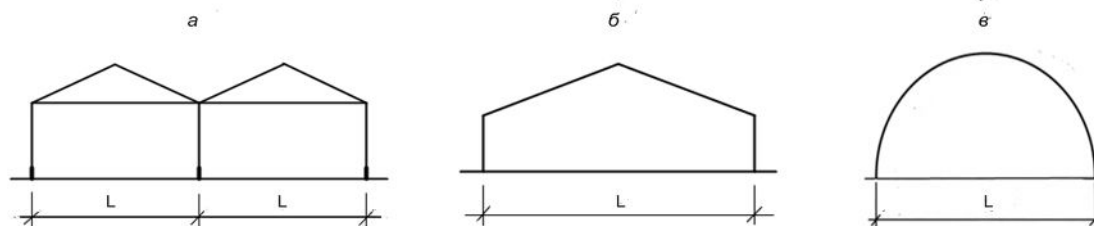


Рис. 1. Основные типы выпускаемых фермерских теплиц:

а – блочная (многопролётная); б – ангарная рамной конструктивной схемы; в – арочная

Из приведенных типов теплиц блочные по расходу стали (7–8 кг/м²), зависящего от конструктивного решения сооружения и снеговой нагрузки, занимают промежуточное положение между однопролётными арочными (5–7 кг/м²) и рамными (10–13 кг/м²). Однако многопролётные теплицы характеризуются меньшим коэффициентом ограждения (отношение площади ограждающих конструкций к площади застройки) по

сравнению с однопролётными (рис. 2), что обуславливает снижение затрат на ограждающие конструкции и отопление. Экономический эффект от двух последних факторов превышает затраты на металлоконструкции. Таким образом, блочные теплицы являются более экономичным типом сооружений по сравнению с однопролётными.

Методика. Обоснование рациональных строительных параметров блочной теплицы построечного изготовления. Методика исследования предусматривала аналитический вывод необходимых зависимостей.

Для принятой площади застройки блочной теплицы соответствующее минимальной площади ограждающих конструкций количество пролётов определяется выражением:

$$n = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{hF_{\Pi}}{4h + Ltg\alpha}}, \quad (1)$$

где L – принимаемый пролёт теплицы, м (в соответствии с СП 107.13330.2012 «Теплицы и парники» не должен превышать 9 м); h – высота продольного ограждения, м (для блочных теплиц минимально равная 2,1 м по СП 107.13330.2012);

α – угол наклона скатов кровли (не менее 25°); F_{Π} – предусматриваемая площадь теплицы, m^2 .

Задаваясь технологически приемлемым пролётом L , по формуле (1) определим n , а затем планировочные размеры блочной теплицы принятой площади, при которой коэффициент ограждения будет минимальным:

$$K_{огр}^{min} = \frac{Ltg\alpha}{2A} + \frac{2h}{nL} + \frac{2h}{A} + \frac{1}{\cos\alpha}, \quad (2)$$

где A – вычисленная длина теплицы, м.

Так, для блочной теплицы площадью $500 m^2$ при принятом пролёте $L = 4$ м, высоте $h = 2,1$ м, угле наклона кровли $\alpha = 30^\circ$ по формуле (1) оптимальное количество пролётов равно пяти, планировочные параметры теплицы 20×25 м, коэффициент ограждения по формуле (2) равен 1,58.

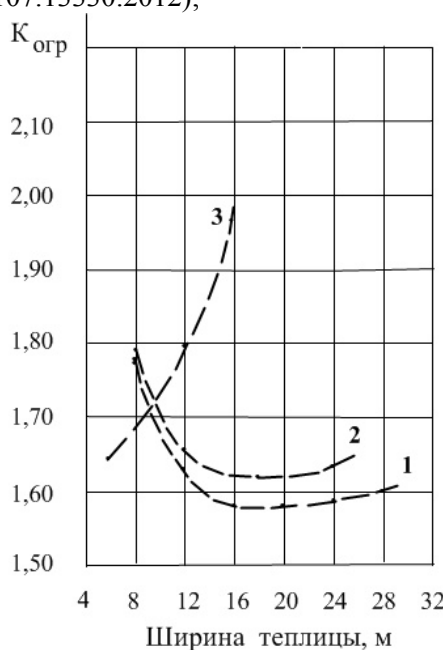


Рис. 2. Изменение коэффициента ограждения теплицы площадью $500 m^2$:

- 1 – блочная теплица ($h = 2,1$ м; $L = 4$ м; $\alpha = 30^\circ$); 2 – однопролётная рамная теплица ($h = 2,1$ м; $\alpha = 30^\circ$); 3 – однопролётная арочная теплица с круговым очертанием кровли

Предлагаемая конструктивная схема стального каркаса блочной теплицы построечного изготовления с узловыми соединениями на сварке приведена на рис. 3. К несущим элементам каркаса относятся стойки, лотки и шпросы. В ограждающих конструкциях блочных теплиц применяются листовое стекло и сотовые поликарбонатные панели. Кровлю теплицы целесообразно предусматривать из листового стекла для обеспечения стаивания осадков во время снегопада и предотвращения образования снеговых мешков в ендовах крыши. В блочных теплицах для снижения теплопотерь в уровне затяжки в горизонтальной плоскости, как правило, предусматривается трансформируемый шторный экран.

Стеклянное ограждение является конструктивным элементом сооружения, толщина стекла зависит от снеговой нагрузки и расстояния

между шпросами. Опираение стекла на конструкции покрытия теплиц может быть различным: на две и более стороны. Наиболее невыгодным с точки зрения работы стекла под нагрузкой является вариант, когда оно опирается двумя сторонами.

Напряжения в этом случае определяются по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{3q_1 C^2}{4bh^2} \leq R_{II}, \quad (3)$$

где q_1 – расчётная равномерно распределённая нагрузка на $1 m^2$ наклонной поверхности остекления; C – пролёт стекла (расстояние между шпросами); b , h – соответственно ширина и толщина стекла; R_{II} – расчётное сопротивление стекла на изгиб по СП 107.13330.2012.

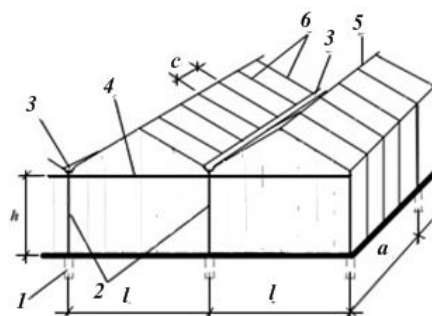


Рис. 3. Предлагаемая конструктивная схема каркаса блочной теплицы построечного изготовления:
1 – фундаментный столбик; 2 – стойка; 3 – лоток для удаления осадков; 4 – затяжка; 5 – коньковый прогон;
6 – шпросы из сдвоенных уголков для опирания стекла

Полагая в формуле (3) $b = 1$ м, $R_H = 10$ МПа (100 кгс/см²) и приравняв напряжения расчётному сопротивлению, после преобразований получим выражение для толщины стекла:

$$h = 0,274C\sqrt{q_1} \text{ (мм)}, \quad (4)$$

где C – в метрах, q_1 – в Па.

Решив равенство (4) относительно C , получим:

$$C = \frac{h}{0,274\sqrt{q_1}}. \quad (5)$$

Связь между нагрузками на 1 м² наклонной (q_1) и горизонтальной (q) поверхности может быть выражена формулой:

$$q_1 = q \cos^2 \alpha,$$

где α – угол наклона кровли теплицы.

При наиболее распространённом угле наклона кровли $\alpha = 30^\circ$ формула (5) примет следующий вид:

$$C = \frac{h}{0,237\sqrt{q}} \text{ (м)}. \quad (6)$$

В соответствии с требованиями СП107.13330.2012 «Теплицы и парники» для теплиц следует применять стекло (ГОСТ 111) унифицированных размеров толщиной не более 4

мм. Стекло должно укладываться на прокладки или мастику и крепиться к шпросам клеммерами или профильными элементами.

В качестве стальных шпросов возможно применение сдвоенных прокатных по ГОСТ 8509-93 или гнутых уголков по ГОСТ 8510-86. Определяющим для подбора сечения шпросов является второе предельное состояние, их прогиб не должен превышать 1/150 пролёта (рис. 4). Установим закономерность изменения расхода стали на шпросы из прокатных уголков. Математической обработкой данных сортамента методом наименьших квадратов установлена эмпирическая зависимость расхода стали на шпросы от момента инерции (рассматривались уголки с полкой 20...50 мм).

$$G_{шпр} = 0,209I + 1,81 \text{ (кг/м)} \quad (7)$$

(статистические характеристики связи: $r = 0,91$; $m_r = 0,045$; $r/m_r = 20$).

Прогиб стержня при продольно-поперечном изгибе определяется по формуле [19]:

$$f = \frac{f_{II}}{1 - \frac{P}{P_3}}, \quad (8)$$

где f_{II} – прогиб стержня от поперечной нагрузки; P – продольная сила; P_3 – Эйлера сила.

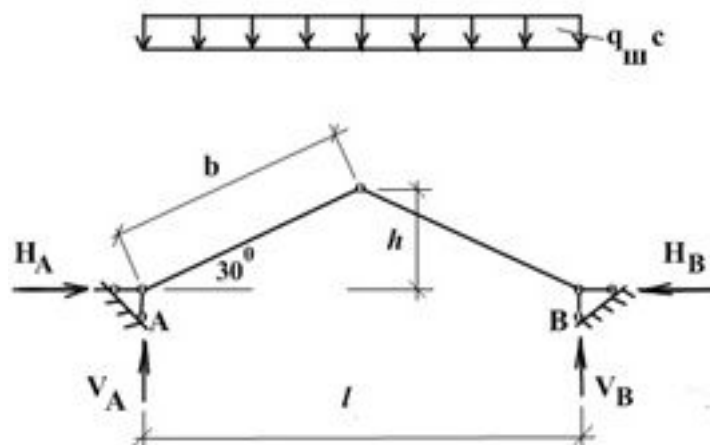


Рис. 4. Принятая расчётная схема шпросов: $q_{ш}$ – снеговая нагрузка на горизонтальную проекцию кровли;
 l – расстояние между точками опирания шпросов, принятое равным пролёту теплицы;
 c – расстояние между шпросами

Прогиб шпроса от поперечной нагрузки

$$f_{II} = \frac{5}{384} \frac{q_{III}^H c b^4 \cos^2 \alpha}{EI}, \quad (9)$$

где q_{III}^H – нормативная нагрузка на шпросы; c – расстояние между шпросами; b – длина шпроса, равная $l/(2\cos\alpha)$; EI – жёсткость сечения шпроса; α – угол наклона шпросов, принятый равным 30° .

Суммарный прогиб шпросов после преобразований:

$$f = \frac{5\pi^2 q_{III}^H c l^4 \sin \alpha}{384(16\pi^2 EI \sin \alpha \cos^2 \alpha - q_{III}^H c l^3)}. \quad (10)$$

Суммарный прогиб шпросов не должен превышать нормируемой величины:

$$f \leq \frac{1}{150} b \leq \frac{l}{300 \cos \alpha}. \quad (11)$$

Приравняв правые части формул (10) и (11), после вычислений получим:

$$I = \frac{q_{III}^H c l}{703} \quad (\text{см}^4), \quad (12)$$

где q_{III}^H – в кгс/м²; c , l – в метрах.

Подставив в эмпирическую зависимость (7) значение момента инерции (12), получим теоретический расход стали на шпросы:

$$G_{III} = \frac{q_{III}^H c l^3}{3364} + 1,81 \quad (\text{кг/м}) \quad (13)$$

Или, умножив на $1/(c \cos \alpha)$ на 1 м² площади теплицы,

$$G_{III}^T = \frac{q_{III}^H l^3}{2913} + \frac{2,09}{c} \quad (\text{кг/м}^2) \quad (14)$$

Лотки в блочных теплицах необходимы для удаления из ендов дождевых осадков и тающего на покрытии снега (рис. 3). В качестве лотков из сортамента металлических профилей целесообразно использовать гнутые швеллеры по ГОСТ 8278-83. Эмпирическая зависимость расхода стали на 1 пог. м лотка в функции момента инерции (рассматривались швеллеры шириной 140...180 мм):

$$G_{II} = 0,117I + 1,57 \quad (\text{кг/м}) \quad (15)$$

$$G_T = \frac{q_{III}^H l^3}{2913} + \frac{2,09}{c} + \frac{q_{II}^H a^3}{689} + \frac{1,57}{l} + \frac{9,45}{a} - \frac{1,19l}{a} \quad (\text{кг/м}^2) \quad (20)$$

Для определения строительных параметров теплицы, соответствующих минимуму расхода стали на каркас, продифференцируем (20) по каждому переменному:

$$\frac{dG_T}{dc} = -\frac{2,09}{c^2} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{dG_T}{dl} = 0,001q_{III}^H l^2 - \frac{1,57}{l^2} - \frac{1,19}{a} = 0 \quad (22)$$

$$(r = 0,89; m_r = 0,06; r/m_r = 15).$$

Момент инерции сечения лотков равен:

$$I = \frac{q_{II}^H l a^3}{80,64}, \quad (\text{см}^4) \quad (16)$$

где q_{II}^H – нормативная нагрузка на лоток, кг/м²; l – пролёт теплицы, м; a – шаг рам каркаса, м;

R_{II} – расчётное сопротивление стали на изгиб.

Подставив выражение для момента инерции (16) в зависимость (15), получим расход стали на лотки из условия расчёта их по деформативности:

$$G_{II} = \frac{q_{II}^H l a^3}{689} + 1,57 \quad (\text{кг/м}) \quad (17)$$

или

$$G_{II}^T = \frac{q_{II}^H a^3}{689} + \frac{1,57}{l} \quad (\text{кг/м}^2) \quad (18)$$

В предлагаемой стоечно – балочной конструктивной схеме (рис. 3) на стойки каркаса опираются лотки для удаления осадков с кровли теплицы. На стойки каркаса блочных теплиц действуют вертикальные и горизонтальные нагрузки, величины которых незначительны. По конструктивным соображениям для стоек теплиц лучше всего подходят двутавровые профили. Расчёты показывают, что в пределах изменения пролёта теплиц от 3 до 6 м и шага стоек от 2 до 4 м при всех возможных сочетаниях нагрузок на шатёр культивационных сооружений в качестве стоек может быть применён прокатный двутавр №10. Получена следующая эмпирическая зависимость расхода стали на стойки каркаса в функции пролёта и шага стоек при изменении планировочных параметров в пределах их вышеуказанных значений:

$$G_{CT} = \frac{9,45}{a} - \frac{1,19l}{a} \quad (\text{кг/м}^2) \quad (19)$$

где a – шаг стоек блочных теплиц, м; l – пролёт теплицы, м.

Удельный расход стали на несущие элементы каркаса теплицы равен сумме зависимостей (14), (18) и (19):

$$\frac{dG_T}{da} = 0,0044q_{II}^H a^2 - \frac{9,45}{a^2} + \frac{1,19l}{a^2} = 0 \quad (23)$$

Функция (21) убывающая, величина C стремится к бесконечности. Следовательно, с увеличением расстояния между шпросами расход стали на них будет уменьшаться, и их шаг необходимо принимать максимально возможным для данных значений снеговой нагрузки и толщины стекла.

Рациональные значения пролёта теплицы и шага стоек определялись графическим решением уравнений (22) и (23). Установленные значения

параметров, соответствующие минимуму расхода стали на каркас теплицы, приведены в табл. 1 применительно к снеговым нагрузкам, установленным в СП «Теплицы и парники».

Таблица .

Рациональные значения шага стоек и пролёта блочной теплицы с каркасом из прокатных профилей

Нормативная нагрузка на лотки, $q_{л}^H$, Па	Наименование строительных параметров теплицы	Рациональные значения строительных параметров, м
200	Пролёт	4,60
	Шаг	2,60
300	Пролёт	4,00
	Шаг	2,45
400	Пролёт	3,60
	Шаг	2,35
500	Пролёт	3,30
	Шаг	2,25

Для приведенных в табл. 1 значений пролёта и шага стоек теоретический расход стали на каркас сооружения составляет около 8 кг/м². Фактически этот расход будет несколько большим, например, из-за отсутствия расчётных профилей. При сложившихся рыночных ценах на стальные профили 50–60 тыс. руб/т удельная стоимость каркаса примерно равна 600 руб/м², что существенно ниже стоимости металлоконструкций заводской поставки.

Заключение. Выведены зависимости, позволяющие рационально запроектировать блочную теплицу построечного изготовления. Для приведенных в нормах проектирования теплиц снеговых нагрузок обоснованы значения пролёта и шага стоек каркаса теплицы, соответствующие минимуму расхода стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блажнов А.А. О применении сотового поликарбоната в ограждающих конструкциях зимних теплиц // Вестник строительства и архитектуры №6. Орловский ГАУ. Орёл: ООО ПФ Картуш. 2017. С. 96–106.
2. Саттарова Р. Сотовый поликарбонат-теплогосберегающее покрытие для фермерских теплиц // ГАВРИШ. М.: Научно-исследовательский институт овощеводства защищённого грунта. 2017. №2. С.48–49.
3. Мухачёв А.Д. Применение поликарбонатов в качестве энергоэффективной светопрозрачной конструкции // Образование, наука, производство: материалы VII Междунар. молодежного форума. БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Изд-во БГТУ. 2015. С. 1326–1329.
4. Нуралин Б.Н., Некрасов В.Г., Мурзагалиев А.Ж., Шевченко С.А., Константинов М.М. Зимние теплицы для континентального климата //

Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. №3(65). С. 81–84.

5. Новикова Ю.К., Голованова Л.А. Обзор современных светопрозрачных материалов // Новые идеи нового века - 2015: материалы XV Международ. науч. конф. ФАДТОГУ. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. 2015. Т.3. С. 260–265.

6. Блажнов А.А., Фетисова М.А. Производственные сооружения для фермерских хозяйств. Орёл: ООО ПФ «Картуш». 2017. 132 с.

7. Юдаев И.В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната-покрывного материала круглогодичных теплиц // Научный журнал Кубанского ГАУ. 2016. №120(06). С. 239–252.

8. Свойства поликарбоната и его широкое применение в современном мире [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://promresursy.com/materialy/polimery/polikarbonat/svoistva.html>. pdf (дата обращения: 12.10.2020).

9. Преимущества поликарбонатных теплиц [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://samostroika.ru/materialy/preimushhestva-polikarbonatnyh-teplic.html>. pdf (дата обращения: 10.10.2020).

10. Теплицы Фермер от производителя [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: msk.teplicity.ru. pdf (дата обращения: 04.10.2020).

11. Теплицы из поликарбоната: преимущества и недостатки [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://dekoriko.ru/teplica/iz-polikarbonata-preimushchestva-i-nedostatki>. pdf (дата обращения: 04.10.2020).

12. Теплицы для фермерских хозяйств ООО «Агрисовгаз» [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://agrisovgaz.ru/?b=grinteh&products=8.pdf> (дата обращения: 04.10.2020).

13. Теплицы промышленные АТЛАНТ | За-вод Атлант. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://steel-roof.ru/promishlennye-teplici.pdf> (дата обращения: 04.10.2020).

14. Теплиці з полікарбонату в Україні [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://prom.ua/Teplitsy-iz-polikarbonata.html.pdf> (дата обращения: 01.10.2020).

15. Цяпліцы беларускай вытворчасці [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://pan.by/dacha-i-sad/teplitsy-parniki-i-ukryvnoy-material/teplitsy-belarus.pdf> (дата обращения: 05.10.2020).

16. Пат. RU2 651807 C1, Российская Федерация, МПК A01G9/14(2006.01). Теплица, покрытая стеклом (варианты) / Н.Ф.Трошкин; Трошкин Н.Ф. №2016143506; заявл. 07.11.2016; опубл. 24.04.2018, Бюл. № 12.

17. Пат. RU 2 676725 C2, Российская Федерация, МПК A01G9/14(2006.01). Теплица, покрытая стеклом / Н.Ф.Трошкин; Трошкин Н.Ф. №2017115423; заявл. 03.05.2017; опубл. 10.01.2019, Бюл. №1.

18. Пат. RU2 601 392C2, Российская Федерация, МПК A01G9/24(2006.01). Теплица зимняя блочная или ангарная ресурсосберегающая / Н.А.Терентьев; Терентьев Н.А. №2015111495/13; заявл. 30.03.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31.

19. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана. 1999, 535 с.

Информация об авторах

Блажнов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Агропромышленного и гражданского строительства. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Россия, 302019, г. Орёл, ул. Генерала Родина, д.69.

Поступила 16.10.2020 г.

© Блажнов А.А., 2020

Blazhnov A.A.

Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin

E-mail: blazhnov47@mail.ru

RATIONAL PARAMETERS OF A MULTI-SPAN GREENHOUSE OF BUILDING PRODUCTION FOR SMALL FORMS OF MANAGEMENT

Abstract. Growing vegetables in cultivation facilities can significantly increase the yield of products compared to open ground. Information data on greenhouses offered by producers for farms is summarized. The main types of farm greenhouses are identified, and they are compared for possible heat losses during the cold period of the year. It is established that with an equal building area, the area of enclosing structures of multi-span greenhouses is less than that of single-span frame and arch type. The formula for the minimum coefficient of fencing for a multi-span greenhouse, which provides a minimum of energy costs during the heating period, is derived. The structural scheme of the steel frame of a multi-span greenhouse of construction production from rolled profiles is proposed. It allows to significantly reduce the cost of construction of the structure in comparison with the cost indicators of greenhouses of factory delivery. The dependences of steel consumption for structural elements of the frame as a function of load and its construction parameters are obtained. Based on the obtained dependencies, the rational values of the span and step of the block greenhouse racks for snow loads specified in the building design standards of greenhouses are established. For rational values of planning parameters of the cultivation structure, specific indicators of steel consumption and cost per greenhouse frame are given.

Keywords: multi-span greenhouse, steel frame, rational parameters of the frame

REFERENCES

1. Blazhnov A.A. On the application of cellular polycarbonate walling winter greenhouses [O primeneniі sotovogo polikarbonata v ograždayushchih

konstrukciyah zimnih teplic]. Bulletin of construction and architecture. No. 6. Orel state agrarian university. Orel: PFKartush Ltd. 2017. Pp. 96–106. (rus)

2. Sattarova R. Polycarbonate – heat-saving coating for farm greenhouses [Sotovyy polikarbonat

– teplosberegayushchee pokrytie dlya fermerskih teplic]. GAVRISH. Moscow. Research Institute of vegetable growing of the protected ground. 2017. No. 2. Pp. 48–49. (rus)

3. Muhachyov A.D. Use of polycarbonates as energy-efficient glass design [Primenenie polikarbonatov v kachestve ehnergoehffektivnoj svetoprozrachnoj konstrukcii]. Proceedings VII international youth forum «Education, science, production». Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. 2015. Pp. 1326–1329. (rus)

4. Nuralin B.N., Nekrasov V.G., Murzagaliev A.Zh., Shevchenko S.A., Konstantinov M.M. Winter greenhouses for continental climate [Zimnie teplicy dlya kontinental'nogo klimata]. Bulletin of the Orenburg state agrarian University. 2017. No. 3(65). Pp. 81–84. (rus)

5. Novikova YU.K., Golovanova L.A. Review of modern translucent materials [Obzor sovremennykh svetoprozrachnykh materialov]. Proceedings of the XV international scientific conference «The new Ideas of New Century – 2015». Khabarovsk. FADTOGU. 2015. Vol. 3. Pp. 260–265. (rus)

6. Blazhnov A.A., Fetisova M.A. Production facilities for farms [Proizvodstvennyye sooruzheniya dlya fermerskih hozyajstv]. Orel: Publishing house Kartush. 2017. 132 p. (rus)

7. Yudaev I.V. Investigation of the light transmitting properties of cellular polycarbonate – covering material of year-round greenhouses [Izuchenie svetopropuskayushchih svoystv sotovogo polikarbonata – pokrovnogo materiala kruglogodichnykh teplic]. Scientific journal of the Kuban GAU. 2016. No. 120(06). Pp. 239–252. (rus)

8. Properties of polycarbonate and its wide application in the modern world. Available

at: <https://promresursy.com/materialy/polimery/polikarbonat/svoistva.html> (accessed 12.10.2020). (rus)

9. Advantages of polycarbonate greenhouses. Available at: <https://samostrojka.ru/materialy/preimushhestva-polikarbonatnyh-teplic.html> (accessed 10.10.2020). (rus)

10. Greenhouse Farmer from the manufacturer. Available at: msk.teplicy.ru (accessed 04.10.2020). (rus)

11. Polycarbonate greenhouses: advantages and disadvantages. Available at: <https://dekoriko.ru/teplica/iz-polikarbonata-preimushchestva-i-nedostatki> (accessed 04.10.2020). (rus)

12. Greenhouses for farms of LLC "Agrisovgaz". Available at: <http://agrisovgaz.ru/?b=grinteh&products=8>. (accessed 04.10.2020). (rus)

13. Industrial greenhouses ATLANT | plant Atlant. Available at: <http://steelroof.ru/promishlennieteplici>. (accessed 04.10.2020). (rus)

14. Polycarbonate greenhouses in Ukraine. Available at: <https://prom.ua/Teplitsy-iz-polikarbonata.html> (accessed 01.10.2020). (rus)

15. Greenhouses of Belarusian production. Available at: <https://pan.by/dacha-i-sad/teplitsy-parniki-i-ukryvnoy-material/teplitsy-belarus> (accessed 05.10.2020). (rus)

16. Troshkin N.F. Greenhouse covered with glass (options). Patent RF, no. 2016143506, 2018.

17. Troshkin N.F. Greenhouse covered with glass. Patent RF, no. 2017115423, 2019.

18. Terentyev N.A. Winter block or hangar resource-saving greenhouse. Patent RF, no. 2015111495, 2016.

19. Feodosiev V.I. Strength of materials [Soprotivlenie materialov]. M.: Bauman Moscow State Technical University. 1999, 535 p. (rus)

Information about the authors

Blazhnov, Aleksander A. PhD, Assistant professor. E-mail: blazhnov47@mail.ru. Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin. Russia, 302019, Orel, st. General Rodina, 69.

Received 16.10.2020

Для цитирования:

Блажнов А.А. Рациональные параметры блочной теплицы построечного изготовления для малых форм хозяйствования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 41–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-41-47

For citation:

Blazhnov A.A. Rational parameters of a multi-span greenhouse of building production for small forms of management. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 41–47. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-41-47

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56

^{1,*}Акимов М.П., ¹Мордовской С.Д., ²Старостин Н.П.¹Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова²Институт проблем нефти и газа СО РАН

*E-mail: mir_akimov@mail.ru

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ И ВЕЛИЧИНЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

Аннотация. Рассмотрен процесс оттаивания-промерзания вмещающего грунта подземного полиэтиленового трубопровода теплоснабжения с теплоизоляцией, эксплуатируемого в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Поставлена задача определения толщины теплоизоляции трубопровода и величины его заглубления на основе анализа температурного поля в грунте в течение многолетних циклов. Температурное поле в системе «теплоизолированная труба-грунт», изменяющееся во времени, предложено определять, решая уравнения теплопроводности в полярных координатах. При этом пучок труб рассматривается как одна труба эквивалентного радиуса. Такой подход позволил упростить условия сопряжения трубы, теплоизоляции, полиэтиленовой оболочки и вмещающего грунта, а также использовать простой численный метод решения уравнения – метод конечных разностей. Приведены результаты расчетов максимальной глубины оттаивания грунта от величины заглубления трубы теплоснабжения при различных толщинах теплоизоляции. Предложено определять оптимальную величину заглубления подземного трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта на уровне границы деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Возможность нахождения нулевой изотермы на таком уровне проиллюстрирована расчетами изотерм к началу отопительного сезона (сентябрь) при различных заглублениях и толщинах теплоизоляции. По результатам расчетов предложена методика расчетного определения толщины слоя теплоизоляции и величины заглубления трубопровода из условия минимизации функционала, характеризующего меру уклонения ординаты нулевой изотермы на левой границе области от уровня глубины деятельного слоя грунта в момент времени начала отопительного сезона.

Ключевые слова: трубопровод, теплоснабжение, многолетнемерзлые грунты, температура, глубина оттаивания, толщина теплоизоляции.

Введение. В настоящее время в практику строительства тепловых сетей широко внедряются опытно-промышленные бесканальные варианты внутриквартальных предизолированных полиэтиленовых подземных трубопроводов теплоснабжения. В то же время, проектные решения прокладки таких трубопроводов недостаточно научно обоснованы. Это связано, прежде всего, с отсутствием методов определения таких параметров теплопровода, как толщина теплоизоляции и величина заглубления, которыми можно управлять тепловым режимом грунта в основании трубопровода. Управление тепловым режимом грунта имеет особую важность при проектировании тепловых сетей в регионах с многолетнемерзлыми грунтами.

Согласно нормативным документам расчет толщины теплоизоляции осуществляется по нормированной плотности теплового потока [1]. Такой расчет, при котором за температуру окружающей среды берется среднегодовая температура грунта на глубине заложения трубопровода, не пригоден для расчетов толщины теплоизоляции

теплопроводов, прокладываемых в регионах распространения многолетнемерзлых грунтов. Кроме того, при таких расчетах толщина теплоизоляции не связана с величиной заглубления теплопроводов, что не соответствует реальному процессу теплового режима в многолетнемерзлых грунтах. При проектировании тепловых сетей в районах распространения многолетнемерзлых грунтов толщину слоя теплоизоляции необходимо определять в комплексе с величиной заглубления теплопровода, основываясь на анализе динамики границы оттаивания грунта. Отсутствие подобной методики расчета приводит к негативным последствиям при практическом использовании перспективных трубопроводов теплоснабжения подземной прокладки.

В условиях эксплуатации подземного теплопровода тепловое состояние грунта в течение годового цикла претерпевает значительные изменения. Это обусловлено не только изменением температуры окружающего воздуха, но и температурным режимом теплоносителя. На динамику температурного поля грунта существенное влияние имеют также толщина слоя теплоизоляции и

глубина заложения трубопровода. В регионах распространения многолетнемерзлых грунтов прокладка теплопровода с использованием недостаточно обоснованных параметров может привести к ежегодному увеличению ореола оттаивания вокруг теплопровода и потере его устойчивости. Имеется достаточно большое количество научных работ, посвященных исследованию температурного поля в основании бесканальных полимерных трубопроводов [2–4]. В то же время актуальной проблеме сохранения многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземного теплопровода уделяется недостаточное внимание.

В целях снижения теплопотерь подземные трубопроводы теплоснабжения прокладываются в пучке с другими трубопроводами, который можно рассматривать как один трубопровод [5]. Тогда температурное поле в многослойной трубе и грунте можно описать уравнением теплопроводности в полярных координатах, упрощающей условия сопряжения трубы, теплоизоляции, полиэтиленовой оболочки и вмещающего грунта.

Для учета теплоты фазового перехода воды в уравнении теплопроводности удобнее воспользоваться фронтальной моделью, согласно которой фазовое превращение происходит на границе мерзлого и талого грунта [6–9]. При численном

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right), (r, \varphi) \in \Omega. \quad (1)$$

На поверхности грунта граничное условие третьего рода запишем в виде:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\cos\varphi - \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}\sin\varphi\right)\Big|_{\Gamma_1} = -\alpha_{eff}(T(r, \varphi, t) - T_{air}(t)). \quad (2)$$

В условии (2) эффективный коэффициент теплообмена α_{eff} в зимний период вычисляется в зависимости от толщины снега, T_{air} – температура окружающего воздуха.

На удалении от теплопровода условие отсутствия теплового потока в горизонтальном направлении запишем в виде:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\sin\varphi + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}\cos\varphi\right)\Big|_{\Gamma_2} = 0. \quad (3)$$

В виду симметричности температурного поля справедливы условия:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi}\Big|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi}\Big|_{\Gamma_5} = 0; \quad (4)$$

На внутренней поверхности теплопровода происходит конвективный теплообмен с теплоносителем с температурой T_{water} :

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Gamma_4} = \alpha(T(r, \varphi, t) - T_{water}). \quad (5)$$

На границах разнородных тел запишем условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{i-0}} = \lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{i+0}}; \quad (6)$$

$$T(r_{i-0}, \varphi, t) = T(r_{i+0}, \varphi, t), \quad (7)$$

где i – номер слоя.

решении уравнения теплопроводности, учитывающего фазовое превращение, трудность представляет определение границ твердой и жидкой фаз. Эффективным методом решения подобных уравнений является метод сквозного счета, предложенный в работе [10] и применяемый для решения многих прикладных задач [11–14]. Численные алгоритмы решения задачи определения динамики температурного поля грунта вокруг подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией рассматривались в работах [15, 16]. Результаты решения задач теплового режима в системе «грунт-труба» не применялись для решения задач проектирования теплопроводов, в частности определения толщины теплоизоляции и глубины заглубления.

Целью данной работы является разработка методики определения толщины теплоизоляции и величины заглубления подземного трубопровода теплоснабжения, прокладываемого в регионах с многолетнемерзлыми грунтами на основе анализа динамики нулевой изотермы (изотермы 0°C) в области вмещающего грунта.

Постановка задачи. В рассматриваемой области (рис. 1) запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

При $t=0$ зададим начальное условие:

$$T(r, \varphi, 0) = T_{init}(r, \varphi). \quad (8)$$

В уравнении (1) с начальными и граничными условиями использованы следующие обозначения: T – температура; $\rho(T)$, $\lambda(T)$ – эффективные (сглаженные) коэффициенты теплоемкости и теплопроводности; r , φ – полярные координаты; t – время. Поставленная задача решалась методом конечных разностей. Расчеты проводились с шагом по времени равным 3 часа. Проводились предварительные расчеты для определения начального распределения температуры следующим образом. За начальное время бралось первое число сентября. За начальное условие принималось однородное распределение температуры в рассматриваемой области с температурой -3°C . Проводились расчеты 3 летнего цикла, в результате которого распределение температуры в рассматриваемой области в начале сентября становится практически не зависящим от начального условия. Полученное температурное поле принималось за начальное условие при расчетах.

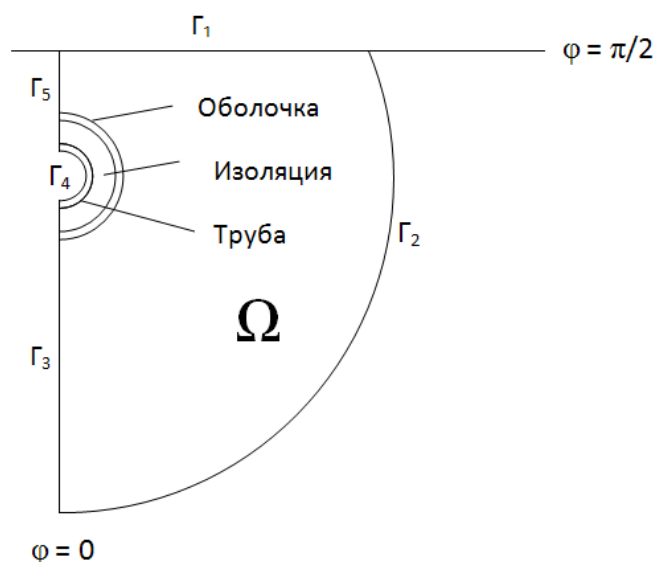


Рис. 1. Расчетная область предизолированного трубопровода и грунта:
 Ω – область; Γ_1 – дневная поверхность; $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ – границы области, φ – угловая координата

Результаты расчетов. Обсуждения. Методику определения толщины теплоизоляции и величины заглубления подземного трубопровода теплоснабжения изложим на примере расчета температурного режима вмещающего грунта при

воздействии трубопровода теплоснабжения с эквивалентным радиусом 81,5 мм.

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик материалов, принятые в расчетах [17–18].

Таблица 1

Теплофизические характеристики грунта и материалов теплопровода

Параметр	Труба из сшитого полиэтилена	Изоляция из пенополиуретана	Оболочка из полиэтилена	Талый грунт	Мерзлый грунт
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,35	0,05	0,42	1,4	1,5
Плотность, кг/м ³	938	33	960	1700	1700
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	2300	1800	1700	1850	1750

Примем, что температура теплоносителя T_{water} в летний период (май-август) равна 10 °С, в отопительный период – меняется от 80 до 95 °С

в зависимости от температуры окружающего воздуха. Влажность грунта равна 0,18. Коэффициент теплообмена α на внутренней поверхности трубы вычислялся по формуле [19]:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_1}{\pi r_1}, \quad Nu = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8}, \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad Re = \frac{w \pi r_1}{\nu}, \quad (9)$$

где ν – кинематическая вязкость воды, α – коэффициент температуропроводности воды, w – скорость течения воды в трубе; r_1 – внутренний радиус трубы.

Эффективный коэффициент теплообмена α_{eff} на дневной поверхности грунта определялся из формулы [7–9]:

$$\frac{1}{\alpha_{eff}} = \frac{1}{\alpha_{air}} + \frac{h_{snow}}{\lambda_{snow}}, \quad (10)$$

где α_{air} – коэффициент теплообмена поверхности с окружающим воздухом; h_{snow} , λ_{snow} – толщина и коэффициент теплопроводности снежного покрова.

В начальный момент времени расчета (1 апреля) температурное поле в грунте не известно. В качестве начального распределения температуры задавалось однородное температурное поле со значением -3 °С. Расчеты показали, что температурное поле в исследуемой области после нескольких годовых циклов практически не зависит от начального распределения температуры. В связи с этим далее приводятся результаты расчетов после трехлетнего цикла.

Изменение температуры окружающего воздуха во времени описывалось функцией средне-

суточных температур, полученной статистической обработкой двадцатилетних температурных данных:

$$T(t) = 30,1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365} + 10\right) - 8,2 \quad (11)$$

Заглубление тепловых сетей до верха оболочки при бесканальной прокладке полиэтиленовых трубопроводов согласно нормативным документам принималось не менее 0,7 м. Исследовалось влияние величины заглубления подземного трубопровода теплоснабжения на тепловое состояние вмещающего грунта. Варьировались величина заглубления трубопровода в интервале

[70, 130] с шагом 20 см и толщина теплоизоляции в интервале [2, 5] с шагом 1 см. Расчетами с многолетними циклами показано, что, несмотря на минимальные температуры окружающего воздуха, максимальная глубина оттаивания достигается в январе. На рис. 2 представлены зависимости максимальной глубины оттаивания грунта от величины заглубления трубы теплоснабжения при различных толщинах теплоизоляции. Увеличение заглубления и уменьшение толщины теплоизоляции приводят к увеличению глубины оттаивания.

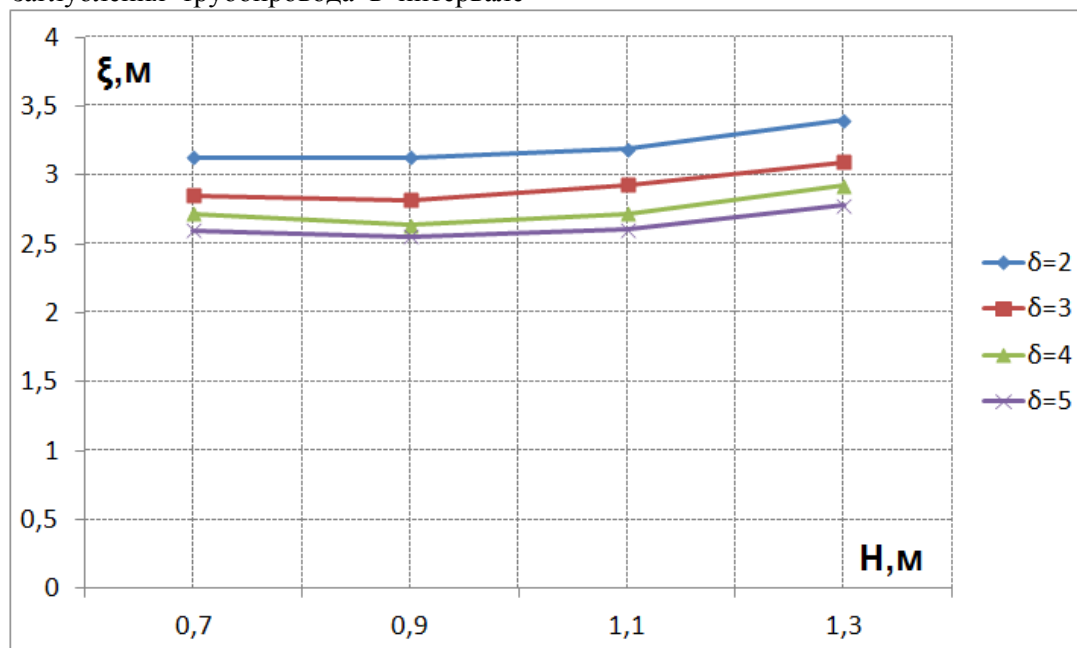


Рис. 2. Зависимости максимальных глубин оттаивания $\xi_{от}$ от величины заглубления трубы H при различных толщинах теплоизоляции δ

Расчеты показывают, что при всех рассматриваемых толщинах теплоизоляции и величинах заглубления нулевая изотерма расположена в области теплоизоляции, что свидетельствует об отсутствии замерзания теплоносителя. Такое поведение нулевой изотермы не позволяет при заданной толщине теплоизоляции величину необходимого заглубления определять из условия недопущения замораживания теплоносителя. Наиболее практичным является определение оптимального заглубления подземного трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта на уровне границы деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Такое заглубление будет оптимальным с точки зрения сохранения стабильной глубины оттаивания в окрестности трубопровода в течение продолжительного времени, поскольку процесс оттаивания грунта под воздействием теплопровода ежегодно будет повторяться с одного и того же уровня глубины. Увеличение толщины теплоизоляции выше расчетной при фиксированной величине заглубления приводит к

смещению нулевой изотермы в основании трубопровода выше границы деятельного слоя, т.е. образованию под трубой валика из мерзлого грунта. Такая граница оттаивания грунта будет препятствовать миграции влаги в горизонтальном направлении и может привести к негативным последствиям.

Численными экспериментами, при которых варьировалась толщина теплоизоляции, для рассматриваемых климатических условий была установлена минимальная толщина теплоизоляции равная 3 см, обеспечивающая установление к началу отопительного сезона нулевой изотермы в грунте на уровне границы деятельного слоя (рис. 3–6). Координата глубины деятельного слоя из рисунков определяется по значению ординаты нулевой изотермы на расстоянии 8 м от начала координат.

К началу отопительного сезона нулевая изотерма в области вмещающего грунта восстанавливается до уровня границы деятельного слоя при величине заглубления трубопровода 70 см и толщине теплоизоляции 3 см. При заглублении

трубопровода 90 см толщина теплоизоляции должна быть 4 см, при заглублении 110 см – 5 см. При заглублении $H = 130$ см толщина теплоизоляции h должна быть более 5 см (рис. 6) и может быть рассчитана по формуле

$$h = \frac{H-0,1}{20}, 0,7 \leq H \leq 1,3.$$

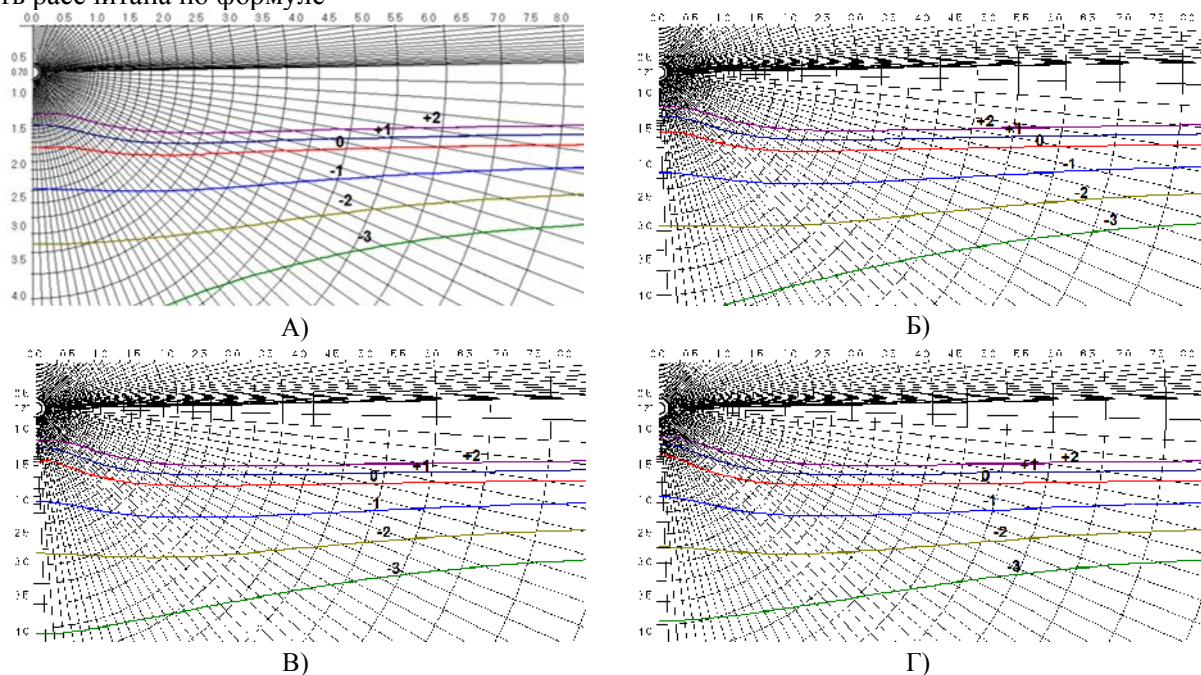


Рис. 3. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 70 см при различных толщинах теплоизоляции δ :

А – $\delta=2$; Б – $\delta=3$; В – $\delta=4$; Г – $\delta=5$ см

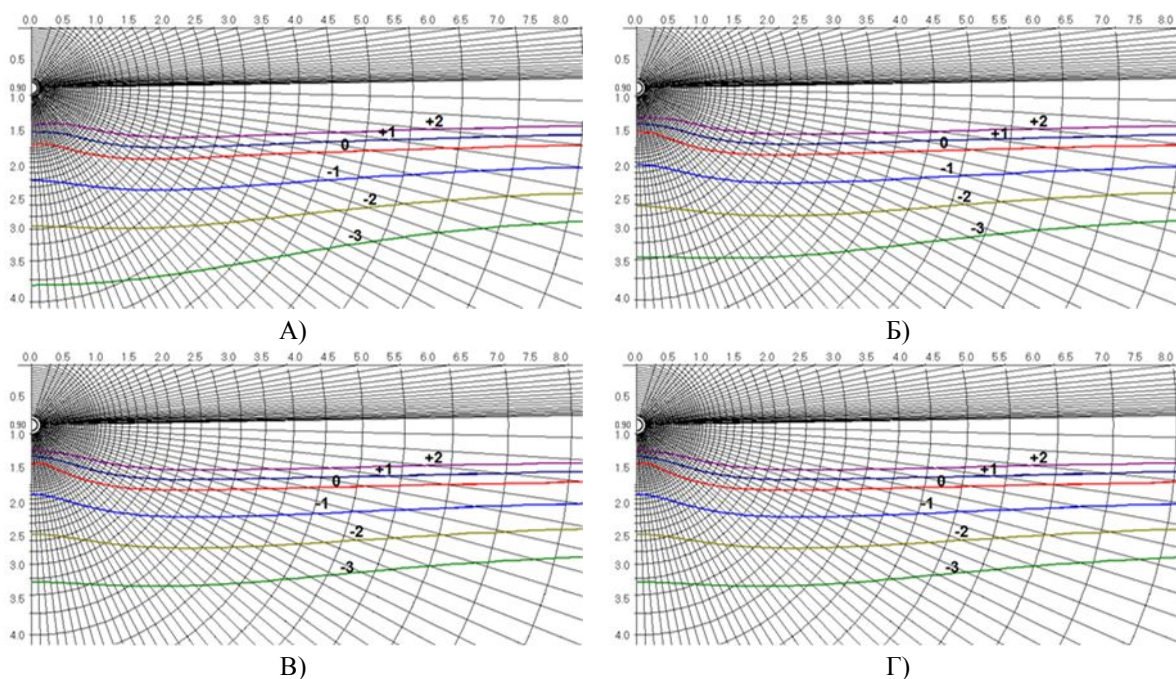


Рис. 4. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 90 см при толщинах теплоизоляции δ : А-Г соответствуют δ рис. 3

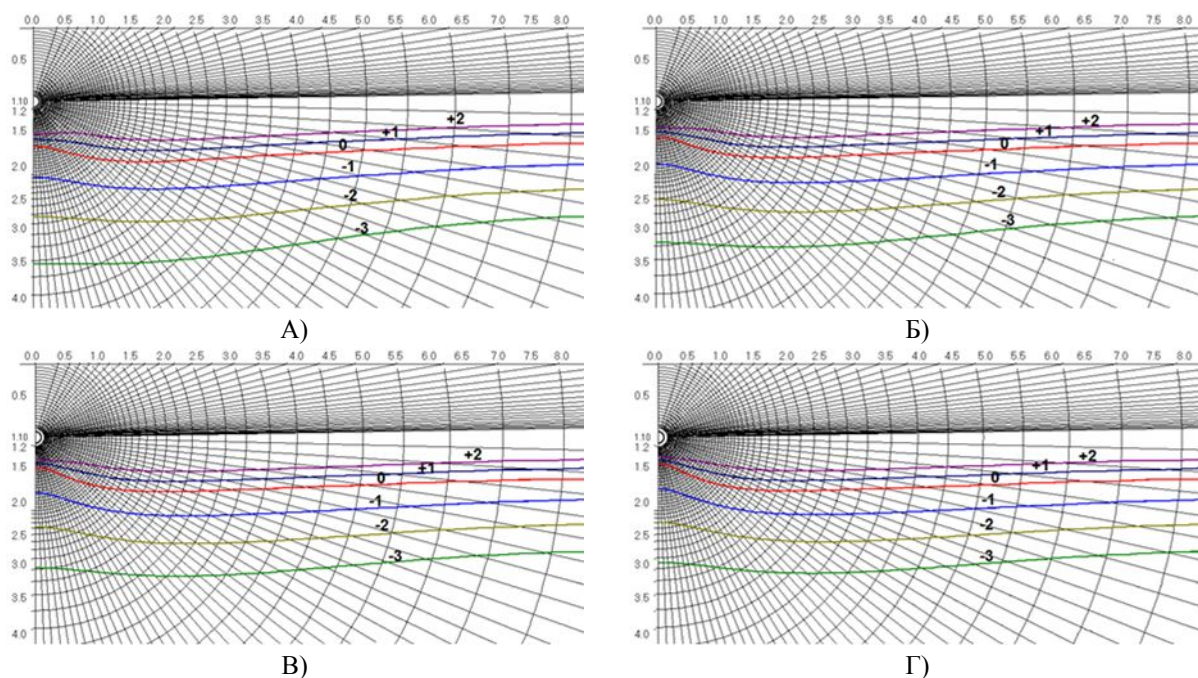


Рис. 5. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 110 см при различных толщинах теплоизоляции δ :

А–Г соответствуют δ рис. 3

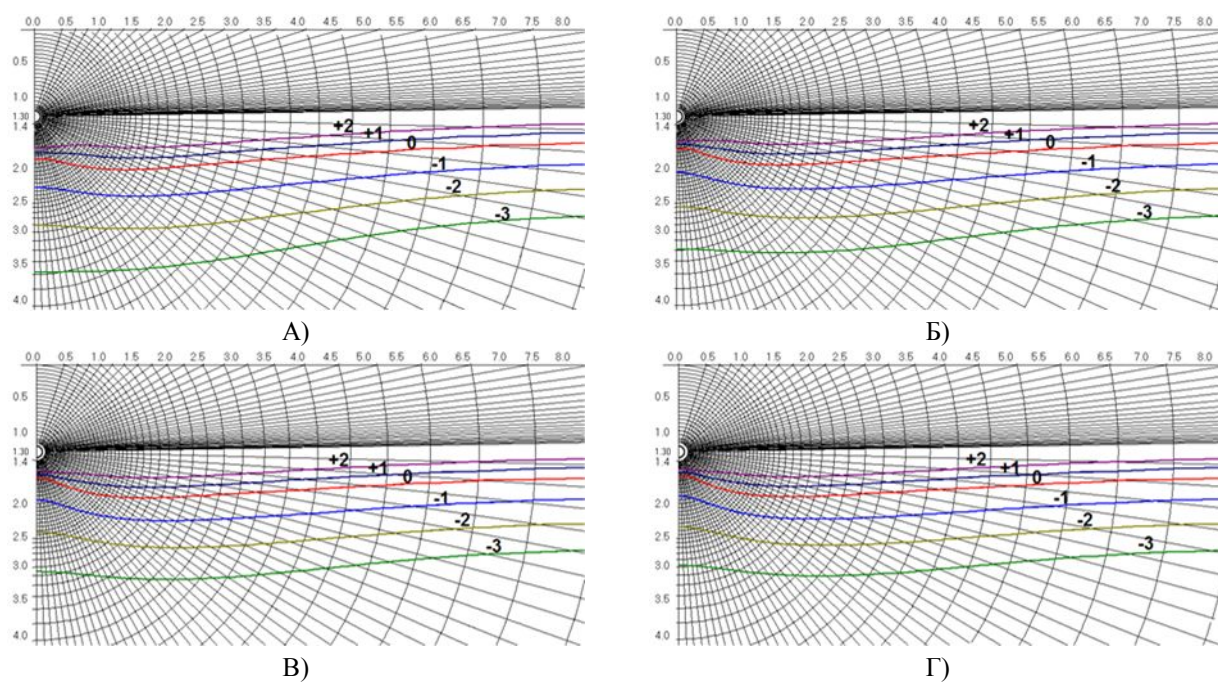


Рис. 6. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 130 см при различных толщинах теплоизоляции δ :

А–Г соответствуют δ рис. 3

Предлагаемая методика определения параметров подземного трубопровода теплоснабжения (величины заглубления H и толщины слоя теплоизоляции δ) сводится к минимизации функционала:

$J[H, \delta, t_s] = [y(0, H, \delta, t_s) - y(l, H, \delta, t_s)]^2$, (12)
где y – уравнение в декартовых координатах, описывающее нулевую изотерму, зависящее от абсциссы, величины заглубления, толщины слоя

теплоизоляции; t_s – время начала отопительного сезона, l – ширина рассматриваемой области.

Функционал (12), характеризующий меру уклонения ординаты нулевой изотермы на левой границе области от уровня глубины деятельного слоя грунта в момент времени начала отопительного сезона. Минимизация функционала (12) реализуется методом последовательного анализа вариантов.

Заключение. Предлагаемая методика определения параметров трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта к началу отопительного сезона на уровне границы деятельного слоя грунта, может применяться при проектировании подземных тепловых сетей из полиэтиленовых предизолированных труб в регионах распространения многолетнемерзлых грунтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: 2004.
2. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2. С. 16–24.
3. Размазин Г.А., Моисеев Б.В. Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки теплопроводов с вечноммерзлыми грунтами // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов / Сб. материалов I Международной научно-практической конференции. Пенза, ПДЗ, 2000. С.106–110.
4. Половников В.Ю. Численный анализ влияния нестационарности процессов теплопереноса в зонах размещения подземных теплопроводов на их тепловые режимы и тепловые потери // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 76–84.
5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: «Энергия», 1976. 352 с.
6. Andersland O.B, Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013.
7. Слепцов В.И., Мордовской С.Д., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. Н.: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 104 с.
8. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т.28. №10. С. 110–124.
9. Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. М.: Наука, Физматлит, 1997. 224 с.
10. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМ и МФ. 1965. Т.5. №5. С. 816–827.
11. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V. et al. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1629. Pp. 424–431.
12. Pavlova N. V., Vabishchevich P. N., Vasilyeva M. V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems // International Conference on Large-Scale Scientific Computing / Springer. 2013. Pp. 636–643.
13. Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Society for Industrial Mathematics, 2008.
14. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, No. 2. Pp. 154–164.
15. Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Численный алгоритм для исследования влияния бесканального подземного трубопровода теплоснабжения на вечноммерзлые грунты // Математические заметки ЯГУ. 2010. Т.17. №2. С.125–131.
16. Акимов М.П., Захаров П.Е., Матвеева О.И. Численное моделирование динамики температурного поля многолетнемерзлых грунтов при воздействии трубопроводов // Математические заметки СВФУ. 2014. Т. 21. №4. С. 61–70.
17. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Н.: Изд-во СО РАН, 1998. 280 с.
18. Бабищев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
19. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

Информация об авторах

Акимов Мир Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики. E-mail: mir_akimov@mail.ru. Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48.

Мордовской Сергей Денисович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий. E-mail: msd@mail.ru. Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48.

Старостин Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией климатических испытаний. E-mail: nikstar56@mail.ru. Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Автодорожная, д. 20.

Поступила 10.09.2020 г.

© Акимов М.П., Мордовский С.Д., Старостин Н.П., 2020

^{1,*}Akimov M.P., ¹Mordovskoy S.D., ²Starostin N.P.

¹North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov,

²Institute of oil and gas problems of the Siberian branch of the RAS

*E-mail: mir_akimov@mail.ru

ESTIMATION OF THERMAL INSULATION THICKNESS AND DEPTH OF UNDERGROUND POLYETHYLENE HEAT SUPPLY PIPELINES IN REGIONS WITH PERMAFROST

Abstract. The process of thawing and freezing of the host soil of an underground polyethylene heat supply pipeline with thermal insulation, operated in areas of permafrost distribution, is considered. The task is to determine the thickness of the thermal insulation of the pipeline and the size of its depth based on the analysis of the temperature field in the ground during long-term cycle. The temperature field in the "insulated pipe-ground" system, which changes over time, is proposed to be determined by solving the heat conduction equations in polar coordinates. In this case, a bundle of pipes is considered as one pipe of equivalent radius. This approach allows to simplify the interface conditions of the pipe, thermal insulation, polyethylene shell and the host soil, as well as to use a simple numerical method for solving the equation – the finite difference method. The results of calculations of the maximum depth of soil thawing from the depth of the heat supply pipe at different thicknesses of thermal insulation are presented. It is proposed to determine the optimal depth of the underground heat supply pipeline from the condition of annual establishment of the zero isotherm of the host soil at the level of the boundary of the active soil layer by the beginning of the heating season. The possibility of finding a zero isotherm at this level is illustrated by calculations of isotherms by the beginning of the heating season (September) at various depths and thicknesses of thermal insulation. Based on the results of calculations the method of estimation the insulation thickness and depth of the pipeline from the condition of minimizing the functional that characterizes the measure of deviation of the ordinates of the zero isotherm on the left-hand boundary of the region from the depth of the active soil layer at the beginning of the heating season.

Keywords: heat equation, pipeline, heat supply, permafrost, temperature, finite difference method, thawing depth, thermal insulation thickness.

REFERENCES

1. SNiP 41-03-2003. Thermal insulation of equipment and pipelines [Teplovaya izolyaciya oborudovaniya i truboprovodov]. Moscow: 2004.(rus)
2. Polovnikov V.Y., Khuzeev V.A. Numerical analysis of soil freezing impact on heat losses of pipelines [Chislennyj analiz vliyaniya promerzaniya grunta v zone prokladki na teplovyte poteri beskanal'nyh teploprovodov]. Civil engineering magazine. 2013. No. 2. Pp. 16–24.(rus)
3. Razmazin G.A., Moiseev B.V. Thermal interaction channelless pipeline with permafrost soils [Teplovoe vzaimodejstvie beskanal'noj prokladki teploprovodov s vechnomerzlyimi gruntami]. Problems of construction, engineering and urban ecology /proceedings of I international conference. Penza, PDZ. 2000. Pp. 106–110.(rus)
4. Polovnikov V.Yu. Numerical analysis of nonstationary heat transfer influence in the zones of underground thermal pipelines on their thermal regimes and heat losses [Chislennyj analiz vliyaniya

nestacionarnosti processov teploperenosa v zonah razmeshcheniya podzemnyh teploprovodov na ih teplovyte rezhimy i teplovyte poteri]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. Vol. 329. No. 10. Pp.76–84.(rus)

5. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. Solid thermal regime calculation [Raschety teplovogo rezhima tverdyh tel]. Leningrad: "Energiya", 1976. 352 p. (rus)

6. Andersland O.B, Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013.

7. Slepsov V.I., Mordovskoy S.D., Izakson V.Y. Mathematical modeling of heat exchange processes in permafrost [Matematicheskoe modelirovanie teploobmennyyh processov v mnogoletnemerzlyh gornyyh porodah]. Novosibirsk: Science. Siberian publishing company of Academy of Sciences of the USSR. 1996. 104 p.(rus)

8. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasilieva M.V., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Numerical

analysis of temperature dynamics of railway embankment in permafrost [Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya mnogoletnemerzlogo gruntovogo osnovaniya zheleznoj dorogi]. Mathematical Modeling. 2016. Vol. 28, No. 10. Pp. 110–124. (rus)

9. Vasiliev V.I., Maksimov A.M., Petrov E.E., Tsypkin G.G. Heat and mass transfer in freezing and thawing soils [Teplomassoperenos v promerzayushchih i protaivayushchih gruntah]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997. 224 p. (rus)

10. Samarsky A.A., Moiseenko B.D. An efficient shock-capturing schemes for multidimensional the Stefan problem [Ekonomichnaya skhema skvoznogo scheta dlya mnogomernoj zadachi Stefana]. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1965. Vol. 5. No. 5. Pp. 816–827. (rus)

11. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V. et al. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost. AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1629. Pp. 424–431.

12. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems. International Conference on Large-Scale Scientific Computing / Springer. 2013. Pp. 636–643.

13. Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Society for Industrial Mathematics, 2008.

14. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils. Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, No. 2. Pp. 154–164.

15. Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Numerical algorithm for studying heat supply pipeline impact on permafrost [Chislennyj algoritm dlya issledovaniya vliyaniya beskanal'nogo podzemnogo truboprovoda teplosnabzheniya na vechnomerzlye grunty]. Mathematical notes of YSU, Yakutsk, 2010. Vol. 17. No. 2. Pp. 125–131. (rus)

16. Akimov M.P., Zakharov P.E., Matveeva O.I. The numerical simulation of temperature field permafrost soil under the influence of pipelines [Chislennoe modelirovanie dinamiki temperaturnogo polya mnogoletnemerzlykh gruntov pri vozdeystvii truboprovodov]. Mathematical notes of North-Eastern Federal University. 2014. Vol. 21, No. 4. Pp. 61–70. (rus)

17. Gavriliev R.I. Thermophysical properties of rocks and ground cover in permafrost zone [Teplofizicheskie svoystva gornyh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony]. Novosibirsk: publishing house of SB RAS, 1998. 280 p. (rus)

18. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. et al. Physical quantities: reference book [Fizicheskie velichiny. Spravochnik]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (rus)

19. Kutateladze S.S. Fundamentals of heat exchange theory [Osnovy teorii teploobmena]. Moscow: Atomizdat, 1979. 416 p. (rus)

Information about the authors

Akimov, Mir P. PhD, Associate Professor. E-mail: mir_akimov@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, st. Kulakovsky, 48.

Mordovskoy, Sergey D. DSc, Professor. E-mail: msd@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, st. Kulakovsky, 48.

Starostin, Nikolay P. DSc, Professor. E-mail: nikstar56@mail.ru. Institute of oil and gas problems of the Siberian branch of the RAS - a separate division of the Federal state budgetary institution of science of the Federal research center "Yakut scientific center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences", Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, str. Avtodorozhnaya, 20.

Received 10.09.2020

Для цитирования:

Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Расчет толщины теплоизоляции и величины заглубления подземных полиэтиленовых трубопроводов теплоснабжения в регионах с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 48–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56

For citation:

Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Estimation of thermal insulation thickness and depth of underground polyethylene heat supply pipelines in regions with permafrost. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 48–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-57-65

Потапова А.Ю., Белолобская С.В., *Егорова А.Д.

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

*E-mail: ad.egorova@s-vfu.ru

ИСТОРИЯ ГРАДО-ЯКУТСКОГО КАФЕДРАЛЬНОГО ТРОИЦКОГО СОБОРА В КЕРАМИЧЕСКОМ КИРПИЧЕ

Аннотация. Изучение истории производства керамического кирпича в Якутске и хронологии изменения его номинальных размеров очень хорошо просматривается на примере каменных зданий дореволюционного периода, начиная с XVIII в. Многие архитектурные здания из керамического кирпича сохранили свою целостность, неповторимость и исключительность. На основании литературных источников и архивных документов прослеживаются основные этапы строительства Троицкого собора (с 1708 по 1901 гг.), на протяжении которых сформировался уникальный архитектурный облик первого каменного храма города Якутска. Для определения ресурса долговечности кирпичной кладки для возможности реставрации древнего памятника архитектуры – Троицкого кафедрального собора и воссоздания его исторического облика, были отобраны кирпичи XVIII и XIX вв. и определены их физико-механические свойства. Приводятся первоначальные результаты обследования здания с описанием конструктивных особенностей возведения кирпичных стен и перекрытий, результаты исследования физико-механических свойств образцов керамического кирпича разных веков. При этом определено, что керамический кирпич XVIII в. имеет меньшую марку по прочности, чем кирпич XIX в., но находятся в хорошем состоянии, что дает возможность реставрационных работ. Данное исследование является еще одной попыткой осмыслить и понять секреты мастеров, систематизировать и восстановить хронологию истории памятника.

Ключевые слова: этапы строительства, обследования собора, конструктивные особенности, керамический кирпич, каменные здания.

Строительство первых каменных зданий в Якутске. Изучение истории производства керамического кирпича в Якутске и хронологии изменения его номинальных размеров очень хорошо просматривается на примере каменных зданий дореволюционного периода, начиная с XVIII в. Многие архитектурные здания из керамического кирпича сохранили свою целостность, неповторимость и исключительность.

Однако, информация о происхождении керамического кирпича в архивных источниках имеется в обрывочном и крайне скудном объеме. Обследования зданий показали, что кирпич одновременно выступает и как стеновой материал, и как облицовочный, сохраняя свои свойства и декоративность на протяжении веков [1].

С начала освоения Сибири дерево являлось единственным строительным материалом для возведения всех возможных тогда типов сооружений, как оборонных и административных, так и церковных, жилых и хозяйственных. При этом беспощадным врагом деревянного строительства был огонь [2]. Сухой климат и отсутствие водопровода способствовали возникновению и быстрому распространению пожаров, поэтому появилась необходимость заменить деревянные конструкции каменными. Еще одним решающим фактором в пользу развития каменного строительства стало наличие местных залежей глины для изготовления кирпича [1].

На рубеже XVII–XVIII вв. в Якутск по указанию Сибирского приказа из Тобольска для обучения «мастерству каменному» местных жителей и возведения первых зданий были направлены «каменных дел мастера» И.Д. Сметка и А.И. Турна, которые и явились зачинателями каменного зодчества в Якутске [3]. Они построили первое каменное сооружение в городе – здание воеводской канцелярии.

Небольшое одноэтажное каменное здание воеводской канцелярии соорудили «на бутовом ленточном фундаменте глубиной до двух метров... Кирпич изготавливался на месте, полукруглые наличники окон выложены из фигурного кирпича» [4]. По обмерам профессора Н.П. Крадина «стены воеводской канцелярии имели толщину 90 см и сложены были из кирпича размером 29×16×7 см. Внутри стен, по всему периметру здания, проходил дымовой канал прямоугольного сечения размером 24×22 см. Это была система отопления, довольно распространенная в русской архитектуре того времени» [5].

В дальнейшем, на протяжении XVIII в. в Якутске из кирпича велось строительство преимущественно церковных зданий. После завершения строительства Троицкого собора в городе было возведено еще три крупные каменные церкви: Богородицкая церковь (1773 г.), Николаевская церковь (1791 г., разобрана в 1839 г.), Спасская церковь (1800 г.). Каменных храмов

строилось очень мало, поэтому в «Клировых ведомостях» Якутской духовной консистории их наименовали «Градо-Якутскими».

Все первые каменные здания строились на ленточных фундаментах, заложенных на глубину 1,5 – 2 м. Подошвы фундаментов имели ширину 1,25 – 1,5 м при толщине стен 1м, а в храмах – еще толще. Балки пола укладывались на деревянные лежки и столбы, заглубленные до одного метра в грунт. Здания отапливались голландскими печами из обожженного кирпича [6, 7].

До конца XIX в. каменное строительство в Якутске носило единичный характер. В первой половине XIX столетия в городе помимо трех церковных зданий: Предтеченская церковь (1820 г.), Преображенская церковь (1845 г.), Никольская церковь (1852 г.), было построено большое гражданское здание – гостинный двор (1836 г.), а с середины XIX в. появились каменные магазины городского купечества. Препятствием для широкого распространения каменных зданий в городе служили суровые природно-климатические условия, наличие вечной мерзлоты, отсутствие квалифицированных кадров строителей, нехватка и дороговизна строительных материалов. О трудностях обеспечения говорит тот факт, что лес «обыкновенно сплавляется водою по реке Лене с мест выше Якутска за 600 и далее верст, известь ... заготавливается на берегу Лены выше Якутска на 300 верст, железные изделия, как-то: гвозди, инструменты, кроме поковок, за неимением в Якутске выписываются из Иркутска» [3].

Дореволюционный Якутск не имел крупных промышленных предприятий. Для нужд города производилась «выделка» кирпича на так называемых «кирпичных заводах», расположенных в окрестностях города там, где имелась кирпичная глина. Заводы эти представляли собой простые сараи, где рабочие месили глину и обжигали кирпич, употребляя иногда в качестве подсобной силы лошадей и быков [8].

В начале XX в. в городе появились кирпичный и лесопильный заводы, наладилась добыча и доставка необходимого строительного сырья и материалов из близлежащих мест, что способствовало во многом быстрому возведению каменных построек. С начала XX в. до 1917 г. из кирпича в городе были построены библиотека, окружной суд, казначейство, реальное училище, торговые дома богатых купцов, а также казенный винный склад, помещавшийся в трех каменных двухэтажных зданиях, и начато строительство большого архиерейского дома [3].

«По данным переписи 1917 г., в Якутске насчитывалось 1140 зданий, из них каменных

было 48» [3], но в советский период их большая часть была просто уничтожена. С сожалением приходится отмечать, что были снесены без всяких согласований с органами государственной охраны два каменных храма в Якутске – собор на территории Спасского монастыря и остатки Предтеченской церкви на проспекте Ленина [5].

Следует подчеркнуть, что церковные сооружения Якутска относятся к таким образцам культового зодчества, которые требуют углубленного изучения как в силу типичности для всего храмового зодчества Сибири, так и в силу особого своеобразия, продиктованного суровыми условиями Якутии. Дошедшие до нас уникальные памятники культового зодчества – Троицкий собор, церкви и кельи монастыря, были возведены в суровых природно-климатических условиях, на вечной мерзлоте, в зоне сейсмической опасности [9].

Уникальный архитектурный облик первого каменного храма г. Якутска формировался на протяжении двух столетий (с 1708 по 1909 гг.). Основные этапы строительства Троицкого собора прослеживаются на основании изучения архивных документов и проведения натурных обследований.

История строительства. Трудно переоценить роль Троицкого кафедрального собора – первого каменного храма в архитектурном облике города Якутска. Троицкий собор – единственный ориентир, который сегодня обозначает историческое ядро города (рис. 1). Именно на этом месте в 1681–1687 гг. был построен новый деревянный город «против старого острогу» в виде двойной крепости, куда «со старого места были перенесены соборная Троицкая церковь и другие казенные строения» [10].

Зимой 1701 г., в самые жестокие морозы, в деревянном городе случился пожар внутри соборной церкви, что была построена «в городской стене». От разбушевавшегося пламени «дотла сгорели, кроме церкви, колокольня, приказная изба, караульня, казенный амбар внутри города и городовые стены с южной и восточной сторон, протяженностью в 70 сажень» [11]. Закладка каменного Троицкого собора состоялась «в лето 1708 года, месяца июня в 27 день, в граду Якутском» [12], а завершено строительство было в 1728 г.

Троицкий храм первоначально представлял собой кубообразный объем с алтарной пристройкой. Внутреннее пространство бесстолпного, квадратного в плане храма было перекрыто сомкнутым сводом. Здание храма не отапливалось.



Рис. 1. Троицкий собор в г. Якутске (фото 1913 года)

Второй этап в строительстве собора связан с увеличением его площади за счет пристройки трапезной и северного придела. Начался он вскоре после образования в 1731 г. Иркутской епархии, в ведение которой перешла Якутская епархия. Другой причиной расширения церковного здания послужил рост численности населения города.

В материалах Второй Камчатской экспедиции (1733–1743 гг.) дается краткое описание города с упоминанием собора: «Якуцк город Иркутской провинции на левом берегу Лены... Город деревянной рубленой четырехугольной мерою в длину 60, в ширину 40 сажень, две стены целые с западной да с северной стороны, которые остались от пожара 1700 году; ... В городских стенах 5 башен... В городской же стене от Лены реки проезжие ворота, а у оных ворот ... по левую сторону воеводская канцелярия и при ней кладовая палата..., каменные, ...а с другую сторону на углу соборная церковь Живоначальная Троицы с пределом Успения Пресвятыя Богородицы и с колокольнею каменная от канцелярии до соборной церкви выложена стена каменная длиною 6 сажень» [13]. Историк А.А. Калашников также приводит сведения за 1767 г. о том, что «при каменной Троицкой церкви у собора перед алтарем построена довольно высокая каменная колокольня на средства купца Ивана Горшкова и нотариуса Матвея Десяткина» [14].

Таким образом, можно заключить, что к середине XVIII в. к «холодному» собору были пристроены «теплые» объемы трапезной и северного придела, что значительно увеличило вместимость храма, а соборный комплекс был дополнен колокольней и каменной оградой.

В 1840 г. архитектор А. Пантелеев по просьбе духовных властей провел обследование здания Троицкого собора, пострадавшего от землетрясения «бывшего здесь тридцать лет тому назад» [16]. При обследовании была обнаружена деформация стен, а «главнейшие трещины оказались в своде над алтарем», что и было зафиксировано в акте осмотра [16].

В третий раз значительная перестройка храма началась по инициативе архиепископа Камчатского, Курильского и Алеутского Иннокентия (Вениаминова) в середине XIX в.

В 1854 г. начался разбор свода алтаря с восточной стороны и строительство нового южного придела. Об этих событиях сохранилась Памятная запись в «Клировых ведомостях Градо-Якутского Троицкого собора за 1854 год»:

«1. В 1854 году, по распоряжению Его Высокопреосвященства, при Троицком соборе разобран кирпичный алтарь до основания и вместо его сложен, в том же году, из кирпича новый.

2. 19 сентября того же года заложен придел с южной стороны храма во имя Святителей и Чудотворцев, Димитрия Митрополита Ростовского и Иннокентия 1-го Епископа Иркутского» [17].

Можно заключить, что в 1858 году была практически завершена перестройка Троицкого кафедрального собора, в результате которой к старинному объему с трапезной и северным приделом были пристроены южный придел, а с западной стороны – притвор с деревянной папертью.

Известно, что «ремонтные работы» проводились не только в 1858 г., но и в 1901 г. [18].

С 1901 г. начался последний четвертый этап перестройки собора. В это время был расширен притвор в сторону южного придела. Деревянное

крыльцо было разобрано, а новая каменная паперть, увенчанная небольшой главкой, поставлена по центру притвора на продольной оси храма [19].

Благодаря пристройке южного придела и новой каменной паперти Троицкий храм приобрел свой законченный вид. Общая длина здания составила 42 м, ширина – 27 м.

В начале двадцатого столетия проезжавший через Якутск священник Вениаминов заметил, что «особенную красоту Якутску придают монастырь и церкви деревянные и каменные, на юго-западном краю Якутска, близ Большой и Иркутской улиц, красуется Свято-Троицкий собор, о пяти позолоченных главах, с такими же небольшими на двух алтарях и на палатке ризничной. Летний соборный храм – древней архитектуры и началом своим восходит ко временам покорения Якутской области» [2].

В 1920 году епархия была ликвидирована, а в 1929 году с собора сняли купола, разрушили колокольню и разместили в здании Национальный театр. В 1954–1958 гг. здание Троицкого собора подвергли значительной реконструкции [20], в результате которой по всему периметру появились надстройки и двухэтажные пристройки. Таким образом, внешний облик здания изменился до неузнаваемости. В годы советской власти в перестроенном здании собора размещался Якутский музыкально-драматический театр, а затем – Театр эстрады [18]. В 2013 г. здание было возвращено Якутской и Ленской епархии.

Натурные обследования. Первое предварительное обследование здания собора было про-

ведено в 2012 г., в результате которого были составлены схематические обмерные чертежи. В 2014 г. и 2015 г. были выполнены натурные обследования памятника с изучением конструктивных особенностей возведения кирпичных стен в разные периоды времени и составлены подробные обмерные чертежи.

Четверик – наиболее ранний из сохранившихся объемов памятника (1708...1728 гг.) со стенами толщиной более 2 м. Крупный кубический объем с наружными размерами 11,5х11,2 м имеет высоту до свеса кровли 12,0 м. Внутреннее помещение четверика перекрыто сомкнутым сводом. На северном и южном фасадах сохранились заложенные окна второго света и остатки порталов, проемы которых имели арочные перемычки. Стены старинного объема выложены верстовой кладкой из брускового большеразмерного кирпича с усредненными размерами 30х(15)16х(7)8 см. При этом рисунок кладки не имеет четкости, так как чередование тычков по вертикали идет неравномерно. Под слоем штукатурки были обнаружены следы срубленных высоких наличников, украшавших когда-то арочные оконные и входные проемы четверика (рис. 2). Это значит, что наряду с обычным брусковым кирпичом применялся целый набор профильного кирпича. Архитектор К.А. Лешевич, работавший в Якутске в начале XX века, высказал предположение, что первые каменные постройки «сработаны московскими мастерами в кирпичном стиле без штукатурки» [21]. Возможно, что и стены древней части храма первоначально не покрывались штукатуркой.



а



б

Рис. 2. Внешний вид кладки наружных стен: а – фрагмент четверика со следами фигурных наличников, б – фрагмент фигурной кладки

Следует отметить, что наличие двух типов большеразмерного кирпича (брускового и профильного) были обнаружены при обследовании старинного объема Богородицкой церкви в г. Якутске в 2005 г. [22, 24].

Трапезная собора (1731 – 1743 гг.) пристроена к четверику с запада во всю его ширину и имеет внушительные размеры: 11,3х16,5 м с высотой до карниза 9,3 м. Боковые стены в нижней части трапезной возведены в виде тройных аркад,

над которыми в верхней части устроены по три полукруглых окна. Лучковые арки толщиной в 2,5 кирпича опираются на массивные пилоны с размерами 1,3×1,3 м. Северный придел (1731–1743 гг.) расположен вдоль северной стены трапезной во всю ее длину и своей алтарной частью заходит на четверик. Придел имеет план неправильной прямоугольной формы. Полукруглая апсида в восточной части придела частично закрывает северный портал четверика.

Высокие стены трапезной выложены крупными большеразмерными кирпичами 29×15×6,5 см. Подобные кирпичи фрагментарно присутствуют в стенах северного придела, полукруглая часть которого с фасада украшена ромбовидным геометрическим рисунком (рис. 3). Вполне вероятно, что подобных декоративных деталей было

больше, но этот придел подвергался наиболее частым переделкам в связи с его аварийным состоянием, и периодически производилась замена кирпича на фасадах. По этой же причине трудно определить первоначальный характер проемов северного придела. В заложенных оконных проемах апсиды сохранилась часть перемычек с криволинейным верхом, в остальных проемах – клинчатые перемычки с прямым верхом.

Южный придел (1854–1858 гг.) с правильной прямоугольной формой плана не имеет апсиды и пристроен к трапезной с юга во всю ее длину. Фасады южного придела не имеют декора, проемы выполнены с клинчатой конструкцией перемычек.



Рис. 3. Украшение ромбовидным геометрическим рисунком

В середине XIX в. при перестройке древнего алтаря и возведении южного придела и притвора использовался более мелкий кирпич, так называемый «казенный» брусковый кирпич с размерами близкими к стандарту того времени: 27×13×6,6 см [22]. В то время кирпичи для строительства изготавливались разными бригадами «по образчику... из глины хорошо выквашенной и надлежащим образом обожженной» [23]. Несовершенная система формовки и обжига давали небольшие колебания в размерах кирпичей в пределах 2 см [24].

Существующий притвор расположен во всю ширину трапезной и обоих приделов и состоит из двух разновременных частей. Более поздняя пристройка отличается цепной двухрядной перевязкой. Каменная паперть не сохранилась.

В середине XX века при перестройке и приспособлении храма под театр было внесено много изменений: пробивались огромные проемы во внутренних стенах, закладывались

кирпичом оконные и дверные проемы, делались пристройки и надстройки. Замена поврежденных участков стен велась уже современным кирпичом с применением цепной кладки, поэтому часто встречается кирпич советского периода, который отличается ярким цветом и более мелкими размерами.

Для определения ресурса долговечности кирпичной кладки для возможности реставрации древнего памятника архитектуры – Троицкого кафедрального собора и воссоздания его исторического облика, были отобраны кирпичи XVIII и XIX вв. и определены их физико-механические свойства.

Изучая номинальные размеры кирпичей, произведенных в разные века, пришли к выводу, что якутские производители XIX века придерживались стандартов, принятых в то время (табл. 1). В 1847 году появился первый стандарт по выпуску кирпичной продукции – «Правила для еди-

нообразной прочной выделки кирпича, долженствующего употребляться как в Санкт-Петербурге, так и в других местах России, на казенных и частных заводах», в которых было подробно

описано, как производить обжиг, сушку, сортировку, ставить клеймо. Этим стандартом фиксировался размер кирпича $6 \times 3 \times 1,5$ вершка ($264 \times 132 \times 66$ см) [25].

Таблица 1

Номинальные размеры керамических кирпичей

№	Вид изделия	Номинальные размеры, мм		
		длина	ширина	толщина
1	Кирпич XVIII века	300	160	80
2	Кирпич XIX века	270	130	66
3	Кирпич XX века	250	120	65

Кирпичи были покрыты слоем известково-песчаного раствора толщиной примерно 2–4 мм, который был удален металлическим шпателем для определения физико-механических характеристик кирпича. Экспериментальные образцы подготовили путем разрезания на отдельные сегменты.

Определение механической прочности керамического кирпича производилось неразрушающим методом с помощью прибора ударного импульса ИПС-МГ4 и разрушающим методом путем испытания образцов на гидравлическом прессе.

Измерение прочности неразрушающим методом производилось непосредственно на поверхности стеновой конструкции в местах отсутствия штукатурного покрытия. Поверхность кирпича перед измерением была очищена сухой тканью. Анализ результатов испытаний показал, что

прочность керамического кирпича варьируется в очень широких пределах. При этом прочность кирпича XVIII в. изменяется от 5,4 до 22,4 МПа, а XIX в – от 14,5 до 39,4 МПа, что еще раз подтверждает соответствие кирпича XIX в. требованиям ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

Результаты испытания кирпичей на гидравлическом прессе показали, что они имеют марку по прочности на сжатие М50 для кирпича XVIII века и М75 для кирпича XIX века. Различие в прочности можно объяснить различием по показателям пористости кирпичей XVIII и XIX веков (табл. 2), таким образом, разница составляет 40 %. При этом определено, что пористость более раннего кирпича имеет больший процент капиллярных пор, которые негативно отражаются как на прочностных показателях, так и долговечности материала.

Таблица 2

Физические характеристики керамического кирпича

№	Наименование показателя	Единица измерения	Кирпичи Троицкого собора	
			XVIII века	XIX века
1	Средняя плотность	кг/м ³	1650	1685
2	Истинная плотность	кг/м ³	2681	2607
3	Пористость	%	37,10	36,70
4	Закрытая пористость	%	30,86	31,86
5	Сорбционная влажность	%	0,57	0,13
6	Водопоглощение по объему	%	6,24	4,84
7	Водопоглощение по массе	%	20,79	17,99
8	Коэффициент насыщения пор водой	—	0,17	0,13

Заключение. Троицкий кафедральный собор имеет сложную строительную историю. Храмовое здание включает в себя несколько разновременных объемов, каждый из которых в отдельности подвергался ремонтам и перестройкам.

В результате проведенных исследований были выделены четыре этапа строительства при возведении Троицкого собора:

- 1 этап (1701–1728 гг.) – возведение древнего четверика «холодного храма» с алтарем;
- 2 этап (1731–1743 гг.) – пристройка трапезной и северного придела;

– 3 этап (1854–1858 гг.) – пристройка южного придела и западного притвора, перестройка центрального алтаря;

– 4 этап (1901–1904 гг.) – расширение притвора, строительство каменной паперти.

Перестройки, произошедшие с памятником после 1930 г. в периодизации не учтены.

Сопоставляя результаты проведенных обследований здания Троицкого кафедрального собора можно сделать следующие выводы:

– по результатам анализа проб кирпичей, извлеченных непосредственно из стеновой конструкции, их состояние можно признать хорошим;

– изученные марки кирпичей по ряду показателей (средняя и истинная плотность, пористость, сорбционная влажность, водопоглощение по массе и объему) соответствуют требованиям современных стандартов;

– на основании проведенных экспертиз материала (кирпича) несущих конструкций считаем целесообразным разрешить проведение работ по реставрации и реконструкции здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егорова А.Д., Потапова А.Ю., Сутакова Э.М., Матвеева Н.А. Применение керамического кирпича для строительства в Якутске // Промышленное Гражданское Строительство. 2016. № 8. С. 25–29.
2. Баландин С.Н. Начало русского каменного строительства в Сибири. Сибирские города XVII – начала XX века. Новосибирск, 1981. С. 174–196.
3. Петров П.П. Градостроительство и архитектура Якутска // Якутский архив. 2007. №2. С. 29–37.
4. Сизых С.Н. Первое каменное здание на вечной мерзлоте // Социалистическая Якутия. 1987. № 121(121063) от 29 мая.
5. Крадин Н.П. Архитектурное наследие Якутска: аннотир. каталог. Якутск: Администрация города Якутска, 1993. 120 с.
6. Петров П.П. Города Якутии. 1861-1917 гг. (Социально-экономический очерк истории). Якутск: Кн. изд-во, 1990. 124 с.
7. Павлов А.А. Город Якутск середины XIX в. // Якутский архив. 2007. №2. С.25–28.
8. Попов Г.А. Сочинения: в 4 т. Т.1. История города Якутска: 1632-1917: краткие очерки. Якутск: Якутский край, 2007. 312 с.
9. Петров П.П. Градо-Якутские Православные храмы. XVII-XX вв. Якутск: Бичик. 2000. 96 с.
10. Резун Д.Я., Василевский Р.С. Летопись сибирских городов. Новосибирск, 1974. 304 с.
11. Сафронов Ф.Г. Город Якутск в XVII – начале XIX веков. Магнитогорск: Дом печати, 1997. 67 с.
12. Якутские епархиальные ведомости, 1895. С. 164–165.
13. Шишигина А.Н. Научное изучение Якутии в XVIII веке: по материалам Второй Камчатской экспедиции. Якутск: Изд-во ЯНИЦ СОРАН, 2005. 299 с.
14. Калашников А.А. Якутия. Хроника. Факты. События. 1632 – 1917 гг. Якутск: Бичик, 2000. 480 с.
15. Национальный Архив Республики Саха (Якутия), Ф.226-и, Оп.1, Д.3, л.183об.–192.
16. Национальный Архив Республики Саха (Якутия), Ф.366-и, Оп.1, Д.158, Л. 1–7.
17. Национальный Архив Республики Саха (Якутия) Ф.266-и, Оп.5а, Д.179, Л.14об.
18. Юрганова И.И. Церкви Якутии: Краткая история / И.И. Юрганова; отв. ред. Д.А. Ширина. 2-е изд., перераб. и доп. Якутск: Триада, 2010. 400с.
19. РГИА, Ф.799, Оп.26, Д.1170, Л. 6.
20. Национальный Архив Республики Саха (Якутия) Ф.1006, Оп.1, № 295, Л. 223.
21. Национальный Архив Республики Саха (Якутия) Ф.12. Оп. 1. Д.101. Л. 1.
22. Местников А.Е., Белолобская С.В. Градо-Якутская Богородицкая церковь – памятник каменной архитектуры XVIII – XIX веков // Строительные материалы. 2010. №4. С. 105 – 107.
23. Национальный архив Республики Саха (Якутия). Ф. 235-и. Оп. 1., Д. 32а. Л.36.
24. Белолобская С.В., Местников А.Е. Производство и применение кирпича в XVIII – XIX веках в условиях вечной мерзлоты. //Современные проблемы производства и использования композиционных строительных материалов: Материалы Всероссийской конференции. Новосибирск: Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2009. С. 199 – 203.
25. Ёлшин Д.Д. Очерк истории кирпичной промышленности в Санкт-Петербурге в XVIII – начале XX в. // Бюллетень Института истории материальной культуры РАН. [№] 7. Материальная культура Санкт-Петербурга. Вып. 1. В. Н. Смирнов, Д. Д. Ёлшин. Кирпичные клейма Санкт-Петербургской губернии середины XIX – начала XX в. Каталог и исследование. СПб.: Изд-во ООО «Периферия», 2017. С. 10–24.

Информация об авторах

Потапова Анна Юрьевна, аспирант, старший преподаватель кафедры «Архитектура и городское строительство» E-mail: anna_200073@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. Россия, 677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Белолюбская Светлана Викторовна, кандидат архитектуры, доцент кафедры «Архитектура и городское строительство». E-mail: svet-bel@list.ru. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Егорова Анастасия Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». E-mail: eg_anastasy2004@mail.ru. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Поступила 30.09.2020 г.

© Потапова А.Ю., Белолюбская С.В., Егорова А.Д., 2020

Potapova A.Yu., Belolyubskaya S.V., *Egorova A.D.
North-East Federal University named after M.K. Ammosov
*E-mail: ad.egorova@s-vfu.ru

HISTORY OF HOLY TRINITY CATHEDRAL (YAKUTSK) IN CERAMIC BRICK

Abstract. The study of the history of ceramic brick production in Yakutsk and the chronology of changing its nominal size is clearly seen on the example of stone buildings of the pre-revolutionary period, starting from the 18th century. Many architectural buildings made of ceramic brick have retained their integrity, uniqueness and exclusivity. Based on literary sources and archival documents, the main stages of the construction of the Trinity Cathedral (from 1708 to 1901) are traced, during which the unique architectural appearance of the first stone church in the city of Yakutsk is formed. Holy Trinity Cathedral in Yakutsk and recreating its historical appearance, bricks of the 18th and 19th centuries are selected to determine the durability of brickwork for the possibility of restoring the ancient architectural monument and their physical and mechanical properties are determined. The initial results of the survey of the building with a description of the structural features of the construction of brick walls and floors, the results of the study of the physical and mechanical properties of ceramic brick samples of different centuries are given. It is determined that ceramic bricks of the 18th century have a smaller grade in strength than bricks of the 19th century, but they are in good condition, which allows the restoration work. This study is another attempt to comprehend and understand the secrets of the masters, systematize and restore the chronology of the monument's history.

Keywords: construction stages, Cathedral surveys, design features, ceramic bricks, stone buildings.

REFERENCES

1. Egorova A.D., Potapova A.Yu., Sutakova E.M., Matveeva N.A. Use of ceramic bricks for construction in Yakutsk [Primenenie keramicheskogo kirpicha dlya stroitelstva v Yakutske]. Industrial Civil Engineering. 2016. No. 8. Pp. 25–29. (rus)
2. Balandin S.N. The beginning of Russian stone construction in Siberia. Siberian cities of the XVII - early XX centuries [Nachalo russkogo kamennogo stroitelstva v Sibiri. Sibirskie goroda XVII – nachala XX veka]. Novosibirsk, 1981. Pp. 174–196. (rus)
3. Petrov P.P. Urban Planning and Architecture of Yakutsk [Gradostroitelstvo i arhitektura Yakutska]. Yakutsk Archive. 2007. No. 2. Pp. 29–37. (rus)
4. Sizykh S.N. The first stone building on permafrost [Pervoe kamennoe zdanie na vechnoi merzlote]. Socialist Yakutia. 1987. No. 121 (121063) of 29 May. (rus)
5. Kradin N.P. Architectural heritage of Yakutsk: Annotir. 2 catalogue [Arhitekturnoe nasledie Yakutska_ annotir. 2 katalog]. Yakutsk: Administration of the city of Yakutsk, 1993. 120 p. (rus)
6. Petrov P.P. City of Yakutia. 1861–1917 (Socio-economic essay on history) [Goroda Yakutii. 1861_1917 gg. _Socialno-ekonomicheskii ocherk istorii]. Yakutsk: Kn.izd-vo, 1990.124 p. (rus)
7. Pavlov A.A. The city of Yakutsk in the middle of the XIX century [Gorod Yakutsk seredini XIX v]. Yakutsk archive. 2007. No. 2. Pp. 25–28. (rus)
8. Popov G.A. Works: in 4 vols.1 History of the city of Yakutsk: 1632–1917: short essays [Sochineniya_ v 4 t. T.1. Istoriya goroda Yakutska_ 1632_1917_ kratkie ocherki]. Yakutsk: Yakutskii krai, 2007. 312 p. (rus)
9. Petrov P.P. Grado-Yakutsk Orthodox Churches. XVII-XX centuries [Yakutskie Pravoslavnie hrami. HVII_XX vv]. Yakutsk: Bichik. 2000. 96 p. (rus)
10. Rezun D.Ya., Vasilevskii R.S. Chronicle of

Siberian cities [Letopis sibirskih gorodov]. Novosibirsk, 1974. 304 p. (rus)

12. Yakut diocesan gazette [Yakutskie eparhialnie vedomosti], 1895. Pp. 164–165. (rus)

13. Shishigina A.N. Scientific study of Yakutia in the XVIII century: based on the materials of the Second Kamchatka expedition [Nauchnoe izuchenie Yakutii v XVIII veke po materialam Vtoroi Kamchatskoi ekspedicii]. Yakutsk: Publishing House YANTS SORAN, 2005. 299 p. (rus)

14. Kalashnikov A.A. Yakutia. Chronicle. Facts. Events. 1632–1917 [Yakutiya. Hronika. Fakti. Sobitiya. 1632–1917 gg.]. Yakutsk: Bichik, 2000. 480 p. (rus)

15. National Archive of the Republic of (Yakutia), f.226-i, op.1, d.3, l.183b. 192. (rus)

16. National Archive of the Republic of Sakha (Yakutia), f.366-i, op.1, d.158, l. 1–7. (rus)

17. National Archive of the Republic of Sakha (Yakutia) f.266-i, op.5a, d.179, l.14b. (rus)

18. Yurganova I.I. Church of Yakutia: A Brief History [Cerkvi Yakutii: Kratkaya istoriya]. 2nd ed., Conversion. and doc. Yakutsk: Triada, 2010. 400 p. (rus)

19. RGIA, f.799, op.26, d.1170, l.6. (rus)

20. National Archive of the Republic of Sakha (Yakutia) f.1006, op.1, No. 295, S. 223. (rus)

21. National Archive of the Republic of Sakha (Yakutia) f.12. op. 1. D.101. l. 1. (rus)

22. Mestnikov A.E., Belolyubskaya S.V. Grado-Yakutsk Bogoroditsky Church – a monument of stone architecture of the XVIII-XIX centuries [Grado_Yakutskaya Bogorodickaya cerkov – pamyatnik kamennoi arhitekturi XVIII – XIX vekov]. Construction materials. 2010. No. 4. Pp. 105–107. (rus)

23. National Archive of the Republic of Sakha (Yakutia). Fund 235-and. op. 1., D. 32a. S.36. (rus)

24. Belolyubskaya S.V., Mestnikov A.E. Production and use of bricks in the 18th-19th centuries in permafrost conditions [Proizvodstvo i primeneniye kirpicha v XVIII – XIX vekah v usloviyakh vechnoi merzloti]. Modern problems of the production and use of composite construction materials: Materials of the All-Russian Conference. Novosibirsk: Publishing House of NGASU (Sibstrin), 2009. Pp. 199–203. (rus)

25. Yelshin D. D., Smirnov V.N. Essay on the history of the brick industry in St. Petersburg in the XVIII - early XX centuries [Ocherk istorii kirpichnoi promishlennosti v Sankt_Peterburge v XVIII – nachale XX v.]. Bulletin of the Institute of the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences. No 7. Material culture of St. Petersburg. Issue. 1. Brick stamps of the St. Petersburg province of the mid-XIX - early XX centuries. Catalog and study. St. Petersburg: Publishing House LLC "Periphery," 2017. Pp. 10–24. (rus)

Information about the authors

Potapova, Anna Y. Postgraduate student, Senior Lecturer. E-mail: anna_200073@mail.ru. North Eastern Federal university of M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinsky Str., 58.

Belolyubskaya, Svetlana V. PhD, Assistant professor. E-mail: svet-bel@list.ru. North Eastern Federal university of M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinsky Str., 58.

Egorova, Anastasiya D. PhD, Assistant professor. E-mail: eg_anastasya2004@mail.ru. North Eastern Federal university of M.K. Ammosov. Russia, 677000, Yakutsk, Belinsky Str., 58.

Received 30.09.2020

Для цитирования:

Потапова А.Ю., Белолубская С.В., Егорова А.Д. История Градо-Якутского кафедрального Троицкого собора в керамическом кирпиче // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 57–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-57-65

For citation:

Potapova A.Yu., Belolyubskaya S.V., Egorova A.D. History of holy trinity cathedral (Yakutsk) in ceramic brick. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 57–65. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-57-65

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-66-74

Шувалов В.М.

Московский архитектурный институт (государственная академия)

E-mail: shuv-vasilij@yandex.ru

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ РЕКРЕАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ В БАНГЛАДЕШ

Аннотация. В статье рассматриваются новые направления в развитии архитектуры рекреационных объектов в юго-восточной Азии, которые необходимо внедрять для формирования современного рекреационно-туристического кластера Бангладеш. Выявляются композиционные, объемно-планировочные, декоративно-стилистические, функциональные и конструктивные особенности в архитектуре рекреационных объектов из бамбука. Предлагается основные объекты размещения (отели, гостиницы, мотели, дома на приезд и дома, носящие статус «второго жилища») и объекты питания (кафе, бары, столовые, рестораны) сооружать, используя традиционные экологические материалы. Перечислены современные методы энергосбережения, их реализация в практике проектирования и строительства в странах с жарко-влажным климатом. При проектировании объектов рекреационно-туристических комплексов внедряются инновационные технологии, материалы и конструкции, повышающие комфортабельность рекреационных объектов. Большую ставку на развитие рекреационно-туристической отрасли в стране делает правительство, создавая экономические преимущества в направлении развития этого бизнеса в Республике Бангладеш, усиливая инвестиционную привлекательность для отечественных и иностранных инвесторов, предлагая льготные налоговые и таможенные режимы по строительству и эксплуатации объектов рекреационно-туристического комплекса. Многие объекты рекреационно-туристической отрасли, возведенные в период 1980-2010 годов, не соответствуют современным требованиям по энергоэффективности, экологичности и эстетической привлекательности, что однозначно крайне негативно сказывается на рекреационной привлекательности некоторых регионов страны. Это особенно актуально для отдаленных и труднодоступных районов, где размещаются созданные объекты.

Ключевые слова: архитектура рекреационно-туристических объектов, тренды развития, кластер рекреационной среды, бамбуковая архитектура.

Введение. Эстетическая привлекательность многих объектов рекреационной отрасли в Бангладеш не соответствуют современным требованиям. Это негативно сказывается на рекреационной привлекательности мест отдыха в некоторых регионах страны. Экологичность и энергоэффективность этих объектов также не соответствует новым национальным нормам.

Барисал, Кхулна, Силхет, Радж-шахи, Читтагонг обладают высоким рекреационно-туристическим потенциалом, очагами нетронутой живой природы, где в среде зарослей джунглей и речных протоков, в непроходимых мангровых лесах и болотах обитают представители редких видов флоры и фауны: слоны, бенгальские тигры, речные дельфины, водяные буйволы.

Получив независимость в 1971 году, правительство Народной республики Бангладеш приступило к активному развитию экономических и туристических связей с другими странами. В сфере образования и туризма связи установлены со многими странами Европы и Азии. Намечено развитие контактов с РФ в областях туризма и культуры. В 1980-е годы правительство Бангладеш приняло новую программу индустриального развития страны, что послужило импульсом в проектировании и строительстве рекреационно-

туристических объектов. Рекреационный сектор в экономике Бангладеш начинает значительно усиливаться. Данный сектор индустрии призван сократить финансовую зависимость страны от внешних экспансий и быстрее интегрироваться в систему мировых экономических взаимосвязей [7, 8]. Страна развивает турбизнес как самостоятельное направление в индустрии, в 2010 году при министерстве был создан совет по туризму "Tourism in Bangladesh". Основными внешними рекреационными потоками, приносящими существенные валютные средства в развитие страны, являются: Индия, Южная Корея, Япония, а также Испания, Германия, Франция, Великобритания и Россия. Рекреационный потенциал Бангладеш, роль которого трудно переоценить в развитии экономики страны из-за её экономической слабости, далеко не использован в полной мере. Это окажет положительное влияние на развитие рекреационной индустрии и на формирование рекреационно-туристических кластеров для зарубежных и отечественных отдыхающих в Бангладеш [10, 11].

В начале XXI века рекреационно-туристический сектор мировой экономики существенно изменяется: Гонконг, Мексика, Малайзия, Сингапур, Индонезия, Филиппины и некоторые другие

страны вышли в лидеры по рекреационному обслуживанию. Находим общие признаки для этих стран: 1 – аттрактивная среда, 2 – дешевая рабочая сила, 3 – наличие избытка рабочей силы, сырья и оборудования. Данные факторы сильно привлекают иностранных инвесторов, которые стремятся к низким затратам и высокому качеству рекреационного обслуживания. Бангладеш обладает всеми перечисленными особенностями и может при условии создания современных *дестинаций*¹ и развития *аттрактивности рекреационной деятельности* занять в их ряду достойное место. Под аттрактивностью рекреационной деятельности подразумевается индивидуальная или групповая привлекательность занятий рекреационной деятельности и их сочетаний [9, 10].

Методы. Анализ и изучение материалов и научных источников литературы и ресурсов интернета, касающихся архитектуры рекреационно-туристического сектора, сравнение иллюстративных и графических материалов. Анализ использования природных возобновляемых материалов в архитектуре, их влияние на экологию и рекреационно-архитектурную среду. Под рекреационно-архитектурной средой подразумевается среда, создающая оптимальные условия для рекреации субъектов в соответствии с их возрастными, психофизиологическими, социальными особенностями. Она предназначена для рекреационных функций и обладает достаточной для потребителя информативностью. Рекреационно-архитектурная среда формируется на основе архитектурной среды².

Основная часть. Основные *аттракторы*³ республики – культурно-исторические и природные. Объекты культурной направленности: историко-археологические памятники, буддийские храмы (вихары) и ступы, индуистские храмы и мусульманские мечети. Природно-климатические *аттракторы*: берега рек и заливы, песчаные пляжи, густой бамбуковый лес и природа с первозданной флорой и фауной. Страна обладает всеми условиями для различных видов активного отдыха: речная или морская рыбалка, морские или речные круизы и пешеходный туризм по историко-археологическим памятникам. Можно развивать и прогулки на слонах, парусный спорт,

катание на водных лыжах, устраивать соревнования по серфингу или гребле и многое другое.

Аттрактивность исследуемой территории рассматривается как основное системное свойство рекреационных ресурсов Бангладеш, его природных, социальных и культурно-исторических объектов, которые определяют их рекреационную ценность и привлекательность.

Ежегодно страну посещает около 1,6 миллионов туристов. Новая задача, поставленная правительством перед архитекторами, – увеличить этот поток до 2,6 миллионов туристов в течение ближайших трех лет и создать условия для их размещения и безопасного отдыха. На развитие этой сферы государство ежегодно направляет из бюджета страны более 8 миллионов долларов. Бангладеш стремится выйти в лидеры по приему туристов на юго-востоке Азии. Привлекать новые потоки туристов в страну необходимо не только природно-климатическими, историко-культурными, археологическими *аттрактами*. Для реализации этой программы необходимо создать новые *дестинации*, увеличить количество объектов размещения и объектов питания более чем в полтора раза. Для этого необходимо изучить тренды развития *рекреационно-архитектурной среды* и архитектуры рекреационных объектов в странах с близким жарко-влажным климатом – Индии, Китая, Вьетнама, Непала, где рекреационно-туристический сектор более развит. Новым направлением в развитии *архитектурной среды* этих стран за последнюю четверть века стало развитие технологий по строительству из бамбука.

Активное использование материала из бамбука при строительстве различных типов зданий и сооружений происходит благодаря разнообразным возможностям и свойствам бамбука. Традиционная конструктивная система – стеновая и каркасная существовала с доисторического периода и сохранила свои строительные методы и приемы до настоящего времени. Эти два способа строительства из бамбука создают разнообразные решения по композиции, архитектуре и образному формированию сооружения. Разнообразные варианты использования бамбука в архитектуре зданий и сооружений демонстрируют

¹**Дестинация** – место назначения туристской поездки, тура, экскурсии; место посещения (территория, местность, город, населенный пункт, туристский центр) гражданами, не проживающими постоянно в данной местности и не относящимися к категории местного населения [9, 10].

²**Среда архитектурная** – совокупность облика и пространства зданий и сооружений (в том числе открытых), предназначенных для определенных функций и наделенных необ-

ходимой и достаточной для потребителя информативностью, в том числе с помощью архитектурной пластики. [СП 31-102-99].

³ **Аттрактор** – (англ. attract – привлекать, притягивать) – компактное подмножество пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого стремятся к нему. Аттрактором в рекреационном кластере может являться притягивающая точка (природный или архитектурный объект), состояния системы, в которые она стремится попасть из любого своего состояния.

технические и эстетические свойства материала и его использование в строительстве.

Технологический институт в Цюрихе (ETH) разрабатывает новые предложения по использованию бамбука при архитектурном проектировании. Сотрудники и студенты швейцарского Федерального института предлагают устойчивую и дешевую альтернативу традиционным материалам стали, бетону и дереву. Основа преимуществ бамбуковой архитектуры – природно-климатические, социальные, экономические условия для возведения зданий в данном регионе [1, 2].



Рис. 1. Театр из бамбука в ботаническом саду «Пердана», Малайзия, Куала-Лумпур [13]

В столице Малайзии Куала-Лумпур построен театр. Автор проекта Элина Джамиль. Театр расположен в ботаническом саду «Пердана». Здание полностью выполнено из бамбуковых конструкций. За достижения в техническом и инновационном решении при строительстве и архитектурном проектировании проект "Bamboo Playhouse" был номинирован на премию в 2017 году на всемирном фестивале архитектуры [13]. Все соединительные детали в бамбуковом театре, построенном на острове озера в ботаническом саду Куала-Лумпур в Малайзии, выполнены из стали. Проектом были предусмотрены новые технологии, дающие экономичное и экологичное решение. По замыслу архитектора и дизайнера Элины Джамиль, природное окружение ботанического сада выступало декоративным фоном (рис. 1).

Бамбуковые игровые площадки в ботаническом саду «Пердана» – многоуровневое сооружение для рекреации и отдыха. Здесь собираются любители гармонии и тихого созерцания. Площадки, расположенные на маленьком острове в центре озера центрального городского парка в

Однако в Бангладеш архитектура с использованием бамбуковых элементов и конструкций развита слабо.

Архитектурная фирма из Китая⁴ разработала проекты жилых домов, которые можно создавать непосредственно на бамбуковых плантациях. Бамбук, необходимый для строительства, берётся из плантаций, затем создаются новые плантации вокруг поселения. Этот проект получил второе место в 2016 г. за экологичность и экономичность архитектурно-проектного решения на конкурсе A'Design Awards в архитектурной категории [12].



окружении бамбуковой рощи и воды, привлекают много любителей спокойного времяпрепровождения [14].

Международная экологическая школа "Panyaden School" имеет спортивный зал "Chiangmai Life", выполненный из бамбуковых конструкций. Школа "Panyaden School" находится в северной столице Таиланда близ города Чианг Май. В основе учебного плана альтернативного образования используются традиции буддийских учений о человеческом разуме и его связи с окружающей природой. Школа Паньяден Скул сочетает, при высоком уровне классического образования, усвоение нескольких иностранных языков и высокое нравственное воспитание. Экологическая школа рассчитана на 300 студентов. В состав экологической школы входят также здания и сооружения, выполненные из земляных блоков и бамбуковых стволов. Новое здание спортивного зала "Chiangmai Life" плавно интегрируется с предыдущими сооружениями и холмистым ландшафтом в природном окружении.

⁴Источник: static6.techinsider.io Пекинская архитектурная студия Penda разработала проект жилого дома из бамбука

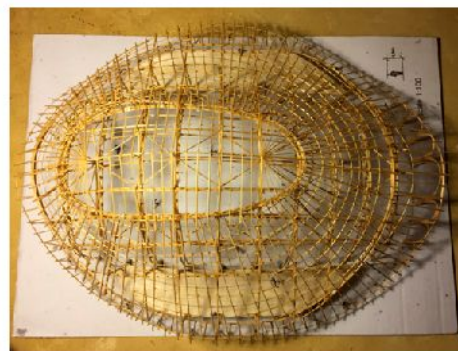


Рис. 2. Бамбуковый спортзал международной школы Паньяден Скул [15]

Спортзал сочетает в себе модный органический дизайн и современное инженерно-техническое решение, которые направлены обеспечивать современные спортивные мероприятия и иные рекреационные функции. Площадь зала 782 м², в состав его включены: площадки для футзала⁵, баскетбольные и волейбольные площадки, площадка для игры в бадминтон. По длинным сторонам зала находятся балконы, здесь места для родителей или других наблюдателей за спортивными мероприятиями или другими праздничными шоу (рис. 2).

Основой конструкции спортивного зала являются стропильные арки, которые создают жесткий каркас здания. Прогоны и криволинейные арочные фермы из бамбука формируют внутреннее пространство зала. Бамбук для несущих конструкций отбирается в соответствии с требованиями стандартов по качеству. После обрабатывания стволов бамбука специальными составами, срок службы конструкций зала рассчитан на 50 лет [15].

Современный экологический материал – бамбук часто используют как альтернативный материал по отношению к традиционным, стали,

бетону и дереву. Современные здания, которые создаются из этого материала, обладают большим преимуществом. Они, имея меньший вес несущих конструкций, обладают высокой сейсмостойчивостью. Планировочное и конструктивное решение зданий из бамбука выполняются с приоритетом безопасности к монтажным элементам и конструкциям. Бамбук, который используется при строительстве зданий и сооружений, должен пройти тщательную и правильную технологическую обработку. Это делает используемый материал долговечным и более прочным. Его можно применить и в большепролетных конструкциях [17, 18].

Элора Харди, архитектор и дизайнер, возводит в Индонезии жилые и нежилые здания и сооружения только из местного бамбука. Бамбуковые конструкции выглядят органично, они не вступают в контраст с природными ландшафтами. Дизайнер Элора использует для строительства ресурсы окружающей природы. Традиционный строительный материал и опыт местных строителей позволяют создавать неповторимые архитектурные объекты из экологичного возобновляемого природного материала. [19].



Рис. 3. Бамбуковые сооружения на острове Бали. Бамбуковый отель. Автор дизайнер Элора Харди [19]

Создавая оригинальные объекты из бамбука, используя баланс древних и современных идей,

автор подчиняет свои проекты инженерным стандартам, использует новейшие технологии и соблюдает экологические требования (рис. 3).

⁵ Футзал – в России и русскоязычных странах чаще всего этот вид спорта называют мини-футболом.

Архитектурная фирма из Вьетнама "Vo Trong Nghia Architects" разработала проект нескольких ресторанов с использованием бамбуковых конструкций. Три ресторана расположены на территории спа-курорта "Retreat Naman". Натуральные бамбуковые конструкции и соломенные крыши дают отдыхающим возможность чувствовать себя на экзотическом острове. Это предназначено для совершенствования физического и



эмоционального состояния рекреантов. Территория спа-курорта "Retreat Naman" содержит площадки и помещения для обучения йоги, а также площадки для пляжного отдыха и водных видов спорта и развлечений [20].

Барные стойки из бамбука в новых ресторанах подчеркивают раскованную курортную атмосферу (рис. 4).



Рис. 4. Барные стойки из бамбука. Спа-курорт "Retreat Naman". Вьетнам [20]

Проект дома "Цветущий бамбук" - (BB (Blooming Bamboo) home) разработан проектной мастерской "H&P Architects". Строительство выполнено в 2013 году. Здание находится

по адресу **Хоан Киём, Ханой, Вьетнам**. Общая площадь здания - 45 м².



Рис. 5. Проект дома "Цветущий бамбук" - (BB (Blooming Bamboo) home) Вьетнам [4]

Бамбуковая архитектура более органична, её выразительность достигается геометрическими формами, естественной фактурой и текстурой бамбука, подчёркивающей его красоту. В наше время в Бангладеш существует около 120 различных сортов бамбука, что становится дополнительным источником для творчески настроенных архитекторов, дизайнеров и садовников, выращивающих бамбук [5, 6, 8]. Во всех регионах Бангладеш и в некоторых иных странах юго-восточной Азии с жарко-влажным климатом бамбуковые рощи занимают более 30 % площади лесов. Бамбук - это травяное растение, которое достигает высокого роста в течение двух месяцев. Ствол бамбука деревенеет и набирает прочность к 4-му году развития. Мощные бамбуковые стволы после 5 летнего созревания выдерживают нагрузки от сжатия и изгиба в 2 раза больше, чем обычные древесные стволы аналогичного раз-

мера. С одного гектара плантации бамбука собирают урожай в 20 раз превышающий аналогичную плантацию лесных растений. На развитие лесных растений до их созревания уходит до 50 лет, бамбук созревает в течение пяти лет. Ствол бамбука можно использовать как конструктивный элемент в необработанном виде, в отличие от традиционных строительных материалов из дерева. Наибольшая плотность ствола бамбука к третьему году развития 600 кг/м³ [2].

Приведенные примеры по использованию бамбука в проектировании и строительстве показывают, что этот материал активно можно использовать в республике Бангладеш при возведении самых разнообразных зданий и сооружений рекреационного назначения, включая и большепролетные объекты (спортивные залы, мосты и др.). Бамбуковая архитектура должна стать новым направлением в развитии архитектуры ре-

креационных объектов для формирования современного рекреационно-туристического кластера Бангладеш.

Наиболее рациональна – кластерная организация рекреационных объектов в Бангладеш, которая представлена группой соседствующих взаимосвязанных зданий и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере рекреации и взаимодополняющих друг друга. Рекреационно-туристский кластер представляет собой территориальное образование автономной единицы, способной обеспечить своим рекреантам набор технических и социально-бытовых функций: жилую, административно-деловую, торгово-развлекательную, рекреационную. Кластер создается государственной инициативой, местными органами власти при нормативной и финансовой поддержке федеральных властей. Процедура создания кластера жестко регламентируется [9, 10].

Выводы. Бренд бамбуковой архитектуры усиливается благодаря использованию современного инженерного оборудования, инновационных методов проектирования и применения параметрической архитектуры. Этот экологический, возобновляемый материал, традиционный в юго-восточной Азии, оказался перспективным и выгодным для капитального вложения средств. Он позволит решить поставленную задачу в развитии рекреационно-туристического бизнеса в Бангладеш, этот материал используется при строительстве разнообразных типов зданий: жилых домов, кафе и ресторанов, спортивных и зрелищных сооружений.

Бамбуковая архитектура завоевывает популярность во многих странах мира. В наше время создаются оригинальные здания и сооружения, где используются новейшие инновационные достижения. Важным методом формирования архитектуры с использованием бамбука является особенность пространственного решения, эстетичность формы, его конструкций и узлов крепления элементов. Созданные здания всегда обладают индивидуальным дизайном, уникальным цветовым и фактурным решением.

Рассмотренные примеры использования бамбука при проектировании и в строительстве в странах с аналогичными климатическими условиями (Китай, Таиланд, Вьетнам) создают уверенность, что строительные материалы с использованием бамбука станут новым трендом развития современной архитектуры рекреационных объектов в республике Бангладеш.

Анализ современных архитектурных проектов с использованием бамбука показал, что данное направление архитектуры находится в фазе

устойчивого развития, которое опирается на новые достижения в техническом и технологическом русле инновационного развития стран юго-восточной Азии. Традиционно исторические сооружения из бамбука послужили опорой в создании современных конструкций и элементов. Основные конкурентные преимущества использования бамбука в архитектуре рекреационно-туристических объектов: технологические, экономические, социальные и экологические будут главными факторами развития этого направления в архитектуре Бангладеш, также этому способствуют климатические и культурно-исторические особенности страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соланилья Медина Й.М., Шувалов В.М., Соланилья О.Ю. Экологический природный материал в архитектуре Симона Велеса и Симона Осье Сампера // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2016. №4(37). С. 157-170 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.marhi.ru/AMIT/2016/4kvart16/PDF/MIT_2016-4\(37\)_Solanilla-Shuvalov_PDF.pdf](http://www.marhi.ru/AMIT/2016/4kvart16/PDF/MIT_2016-4(37)_Solanilla-Shuvalov_PDF.pdf) (дата обращения: 16.12.2018).
2. Соланилья Медина Й.М. Архитектурное проектирование из бамбука как экологического альтернативного материала XXI века // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018. №1(42). С. 201-211 [Электронный ресурс]. URL: https://marhi.ru/AMIT/2018/1kvart18/PDF/15_solanilla_medina.pdf. (дата обращения: 25.02.2019).
3. Кази Шибли Суман, Шувалов В.М. Проблемы формирования рекреационно -туристических комплексов в Бангладеш // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2015. №4 (33). Номер статьи 33/15-07 [Электронный ресурс]. URL: <https://marhi.ru/AMIT/2015/4kvart15/shuvalov/shuvalov.pdf> (дата обращения: 11.09.2018).
4. Солнечное десятиборье [Электронный ресурс]. URL: <https://realty.ria.ru/20100617/84528.html> (дата обращения: 16.01.2018).
5. Малявин В.В. Повседневная жизнь Китая в эпоху Мин. М.: Молодая гвардия, 2008. 224 с.
6. Фирсанов В.М. Архитектура тропических стран. М.: РУДН, 2002. 240 с.
7. Кази Шибли Суман, В.М. Шувалов. Архитектурное формирование рекреационно-туристических комплексов в Бангладеш // *Вестник РУДН / Серия Инженерные исследования*. 2015. №2. С. 58-62.
8. Построить бамбуковый дом [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/images/searchFprd-wret.west->

traditional_construction.jpg&text (дата обращения: 19.07.2018).

9. Шувалов В.М. Синергетические методы в развитии современной архитектуры придорожных объектов // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017. №4(41). С. 257–271 [Электронный ресурс]. URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/4kvart17/PDF/19_shuv_alov.pdf (дата обращения: 27.07.2018).

10. Шувалов В.М. Методы оптимизации придорожных автокластеров // *Градостроительство*. 2017. № 6. С. 25–38.

11. Шувалов В.М., Кази Ш. С. Методы развития рекреационно-туристического потенциала Бангладеш // *Градостроительство*. 2017. № 6. С. 75–83.

12. <https://fishki.net/2044378-fantasticheskij-mnogojetazhnyj-dom-na-dereve-iz-bambuka.html> © Fishki.net (дата обращения: 19.07.2018).

13. https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g298570-d11949782-ReviewsBamboo_Playhouse-Kuala_Lumpur_Wilayah_Persekutuan.html#REVIEWS. (дата обращения: 19.07.2018).

14. https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g298570-d11949782-ReviewBamboo (дата обращения: 19.07.2018).

15. <https://www.admagazine.ru/architecture/sportivnyj-zal-iz-bambuka-v-taillande> (дата обращения: 19.07.2018).

16. Соланилья Медина Й.М. Формирование адаптивной архитектуры на основе конструкций с использованием бамбука // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. №. 4. С. 57–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-57-61

17. Соланилья Медина Й.М. Особенности традиционной архитектуры и строительства из бамбука в странах с жарким влажным климатом // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019. №3(48). С. 175–184 [Электронный ресурс]. URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/13_solanilja.pdf (дата обращения: 18.11.2019).

18. Соланилья Медина Й.М. Традиционные здания и сооружения из бамбука на разных континентах // *Наука, образование и экспериментальное проектирование / Труды МАРХИ: Материалы международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. Московский архитектурный институт*. 2019. С. 398–400.

19. <https://yandex.ru/video/search?text> (дата обращения: 19.07.2018).

20. <https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&text> (дата обращения: 19.07.2018).

Информация об авторах

Шувалов Василий Максимович, кандидат архитектуры, профессор кафедры сельских населённых мест. E-mail: shuv-vasilij@yandex.ru. Московский архитектурный институт (государственная академия). Россия, 107031, Москва, ул.Рожественка, д.11/4, корп.1, стр.4.

Поступила 05.02.2020 г.

© Шувалов В.М., 2020

Shuvalov V.M.

Moscow Architectural Institute (State Academy) – MARHI

E-mail: shuv-vasilij@yandex.ru

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MODERN ARCHITECTURE OF RECREATIONAL FACILITIES IN BANGLADESH

Abstract. *The article discusses new directions in the development of the architecture of recreational facilities in South-east Asia, which need to be implemented to form a modern recreational and tourist cluster in Bangladesh. The author reveals compositional, spatial-planning, decorative-stylistic, functional and design features in the architecture of recreational objects made of bamboo. It is proposed to build the main accommodation facilities (hotels, hotels, motels, arrival houses and houses with the status of "second homes") and food facilities (cafes, bars, canteens, restaurants) using traditional ecological materials. Modern methods of energy saving, their implementation in the practice of design and construction in countries with hot and humid climates are listed. When designing recreational and tourist complexes, innovative technologies, materials and structures are introduced that increase the comfort of recreational facilities. The government relies on the development of the recreational tourism industry in the country, creating economic advantages in the development of this business in the Republic of Bangladesh, increasing the investment attractiveness for domestic and foreign investors, offering preferential tax and customs regimes for the construction and operation of recreational and tourist facilities. Many facilities of the recreational and tourist industry, built in the period*

1980-2010 do not meet modern requirements for energy efficiency, environmental friendliness and aesthetic appeal, which definitely has a negative impact on the recreational attractiveness of some regions of the country, this is especially important for remote and difficult to access areas where created objects.

Keywords: *architecture of recreational and tourist sites, development trends, cluster of recreational environment, bamboo architecture.*

REFERENCES

1. Solanilla Medina Y.M., Shuvalov V.M., Solanilla O.Y. Ecological Natural Materials in the Architecture of Simón Vélez and Simon Hosie Samper [Ekologicheskiy prirodnyy material v arkhitekture Simona Velesa i Simona Os'ye Sampera]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2016. No. 4. Pp. 157–170. URL: [http://www.marhi.ru/AMIT/2016/4kvart16/PDF/AMIT_2016-4\(37\)_Solanilla-Shuvalov_PDF.pdf](http://www.marhi.ru/AMIT/2016/4kvart16/PDF/AMIT_2016-4(37)_Solanilla-Shuvalov_PDF.pdf). (accessed 16.12.2018). (rus)
2. Solanilla Medina Y.M. Architectural Design of Bamboo as an Ecological Alternative Material of the XXI century [Arkhitekturnoye proyektirovaniye iz bambuka kak ekologicheskogo al'ternativnogo materiala XXI veka]. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2018. No. 1. Pp. 201–211. URL: https://marhi.ru/AMIT/2018/1kvart18/PDF/15_solanilla_medina.pdf. (accessed 25.02.2019). (rus)
3. Kazi Shibli Suman, Shuvalov V.M. The problems of the formation of recreational and tourist complexes in Bangladesh [Problemy formirovaniya rekreatsionno -turisticheskikh kompleksov v Bangladesh] *Architecture and Modern Information Technologies*, Nomer stat'i 33/15-07. URL: <https://marhi.ru/AMIT/2015/4kvart15/shuvalov/shuvalov.pdf>. (accessed 11.09.2018). (rus).
4. Solar decathlon [Solnechnoye desyatibor'ye] URL: <https://realty.ria.ru/20100617/84528.html> (accessed 16.01.2018).
5. Malyavin V.V. China's daily life in the Ming era [Povsednevnyaya zhizn' Kitaya v epokhu Min]. M.: Molodaya gvardiya. 2008. 224 p. (rus).
6. Firsanov V.M. Tropical Country Architecture [Arkhitektura tropicheskikh stran]. M.: RUDN, 2002. 240 p. (rus).
7. Kazi Shibli Suman, V.M. Shuvalov. The architectural formation of recreational and tourist complexes in Bangladesh [Arkhitekturnoye formirovaniye rekreatsionno-turisticheskikh kompleksov v Bangladesh]. *Vestnik RUDN. Seriya Inzhenernyye issledovaniya*. 2015. No. 2. Pp. 58–62. (rus).
8. Build a bamboo house [Postroit' bambukovyy dom] URL: https://yandex.ru/images/searchFprdwret.s3-us-west-traditional_construction.jpg&text (accessed 19.07.2018).
9. Shuvalov V.M. Synergistic Methods in the Development of Modern Roadside Objects Architecture [Sinergeticheskiye metody v razvitií sovremen-
- noy arkhitektury pridorozhnykh ob'yektov]. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2017. No. 4. Pp. 257–271. URL: https://marhi.ru/AMIT/2017/4kvart17/PDF/19_shuvalov.pdf (accessed 27.07.2018). (rus).
10. Shuvalov V.M. Roadside Cluster Optimization Techniques [Metody optimizatsii pridorozhnykh avtoklastero] *Urban Planning*. 2017. No. 6 (52). Pp. 25–38.
11. Shuvalov V.M., Kazi S. S. Methods of Developing Recreational and Tourist Potential of Bangladesh [Metody razvitiya rekreatsionno - turisticheskogo potentsiala Bangladesh]. *Urban Planning*. 2017. No. 6. Pp. 75–83.
12. <https://fishki.net/2044378-fantasticheskij-mnogojetazhnyj-dom-na-dereve-iz-bambuka.html> © Fishki.net (accessed 19.07.2018). (rus).
13. https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g298570-d11949782-ReviewsBamboo_Playhouse-Kuala_Lumpur_Wilayah_Persekutuan.html#REVIEWS. (accessed 19.07.2018). (rus).
14. https://www.tripadvisor.ru/Attraction_Review-g298570-d11949782-ReviewBamboo (accessed 19.07.2018). (rus).
15. <https://www.admagazine.ru/architecture/sportivnyj-zal-iz-bambuka-v-taillande> (accessed 19.07.2018). (rus).
16. Solanilla Medina Y.M. Formation of adaptive architecture based on structures using bamboo [Formirovanie adaptivnoy arkhitektury na osnove konstrukcij s ispol'zovaniem bambuka]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 4. Pp. 57–61. DOI: 10.34031 / 2071-7318-2020-5-4-57-61 (rus)
17. Solanilla Medina Y.M. Features of Traditional Architecture and Construction from Bamboo in Countries with a Hot Humid Climate [Osobenosti traditsionnoy arkhitektury i stroitel'stva iz bambuka v stranakh s zharkim vlazhnym klimatom]. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2019, No. 6. Pp. 175–184. URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/3kvart19/PDF/13_solanilla.pdf. (accessed 18.11.2019). (rus).
18. Solanilla Medina Y.M. Conventional Bamboo Buildings and Structures in Different Continents [Traditsionnyye zdaniya i sooruzheniya iz bambuka na raznykh kontinentakh]. *Nauka, obrazovaniye i eksperimental'noye proyektirovaniye*. Trudy MARKHI: Materialy mezhdunarodnoy nauch-

noprakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, molodykh uchenykh i studentov. Moscow, 2019. Pp. 398–400. (rus).

19. <https://yandex.ru/video/search?text> (accessed 19.07.2018). (rus)

20. <https://yandex.ru/images/search?from=tab-bar&text> (accessed 19.07.2018). (rus)

Information about the authors

Shuvalov, Vasiliy M. PhD. E-mail: shuv-vasilij@yandex.ru. Moscow Architectural Institute (State Academy) - MARHI. Russia, 107031, Moscow, St. Rozhdestvenka, Building 1, bulk 1, 11/4.

Received 05.02.2020

Для цитирования:

Шувалов В.М. Тренды развития современной архитектуры рекреационных объектов в Бангладеш // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 66–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-66-74

For citation:

Shuvalov V.M. Trends in the development of modern architecture of recreational facilities in Bangladesh. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 66–74. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-66-74

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88

Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., *Сумской Д.А., Рыжик В.Д.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ВСПУЧЕННОГО ПЕРЛИТОВОГО ПЕСКА

Аннотация. Приведены результаты изучения процессов гидратации вяжущих композиций, полученных при различных соотношениях цемента и отходов вспученного перлитового песка (от 5 до 10 %), в вихревой струйной мельнице, при разных режимах механохимической активации – от одного до трех проходов. Комплексные исследования продуктов гидратации методом рентгенофазового анализа и электронной микроскопии свидетельствуют, что использование высокодисперсных отходов производства вспученного перлитового песка в вяжущих композициях позволяет увеличить содержание гидратных новообразований, вследствие повышения степени гидратации основных клинкерных фаз, а также из-за пуццоланической активности этих отходов. Особое влияние на образование высокопрочной структуры цементного камня оказывает контактная зона между гидратными соединениями и остатками зерен исходных цементов. Структурообразование цементного камня зависит от ряда факторов, на которые можно влиять с помощью различных технологических приемов. При проектировании составов цементных композитов, необходимо гарантировать, чтобы гидратационными продуктами в создаваемой системе присутствовали наряду с низкоосновными гидросиликатами кальция и высокоосновные, а их соотношение должно быть таким, чтобы карбонизация не уменьшала объем сформированной кристаллической фазы цементного камня. Состав продуктов гидратации определяет уровень пересыщения раствора, вид и число посторонних примесей, растворимых в воде, длительность процесса гидратации и т.д. Соответственно меняется и химизм реакций гидратированной системы. Выявлено, что интенсивность дифракционных максимумов, указывающая на присутствие высокоосновных гидросиликатов кальция в составах, которые подвергались механической активации, увеличивается по сравнению с рядовым ПЦ на 18 %. Прочностные характеристики портландцементов, которые подвергались механической активации, возрастают до 15 % по сравнению с исходным ПЦ. Установлена наиболее рациональная вяжущая композиция по составу (№6), механоактивации и максимальной прочностью при сжатии в 28 суточном возрасте – 69,1 МПа.

Ключевые слова: вяжущая композиция, отходы вспученного перлитового песка, рентгенофазовый анализ, процессы гидратации, портландит, гидросиликаты кальция, этtringит, микроструктура.

Введение. Процессы, которые проходят при гидратации портландцемента, очень сложны по причине одновременного протекания множества взаимодействий элементов системы, которые перекрываясь, воздействуют друг на друга одновременно при ограниченном объеме воды. Значительно труднее проходят процессы гидратации и последующего твердения в вяжущих композициях (ВК), при введении дополнительных минеральных компонентов разных по химическому составу, строению и свойствам в уже сложную систему. Число продуктов гидратации, а также их минеральный состав меняется в зависимости от объема воды в системе.

Методология. В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ 1 42,5Н (ГОСТ 31108-2003) ЗАО «Белгородский цемент» и отходы производства вспученного перлитового песка производства ОАО «Осколснаб» (г. Ста-

рый Оскол). Дополнительное измельчение отходов производства вспученного перлитового песка до его введения в композиционное вяжущее не проводилось. Вяжущую композицию получали в центробежном помольном агрегате. Рентгенофазовый анализ проводили на установке ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific. Физико-механические свойства вяжущих композиций определяли в соответствии с нормативными требованиями.

Основная часть. Изучением процессов гидратации и формированием структуры цементного теста и камня занимаются многие ученые [1–7]. Среди специалистов-силикатчиков до сих пор не принято единой теории формирования внутренней структуры цементного камня, хотя существуют различные классические теории и подходы.

В процессе образования цементного камня формируются различные виды структур:

условно-коагуляционные, коагуляционные, конденсационные, кристаллизационно-конденсационные, которые накладываются друг на друга, определенным образом изменяя систему, но каждая вносит свой вклад в формирование прочности композита в зависимости от водоцементного отношения, химического и минерального состава цементного композита, условий и продолжительности твердения [8].

Особенно осложняется изучение этих процессов при введении различных минеральных добавок, вносящих свои особенности в формирование структуры цементного камня [9–11].

Исследования показали [12–14], что присутствие в цементном камне гидросиликатов повышенной основности или свободного гидроксида кальция, обеспечивает высокую долговечность композиту. В случае присутствия в системе гидросиликатов пониженной основности, будет складываться тенденция к снижению прочности, что, вероятно, связано с изоморфным замещением кристаллов гидросиликатов кристаллами карбоната кальция.

Проведены исследования по изучению влияния разработанных композиционных вяжущих, имеющих в своем составе минеральные частицы различных минералов, которые создают определенный эффект внутренних микронаполнителей, обеспечивая требуемые свойства создаваемому композиту [15–21].

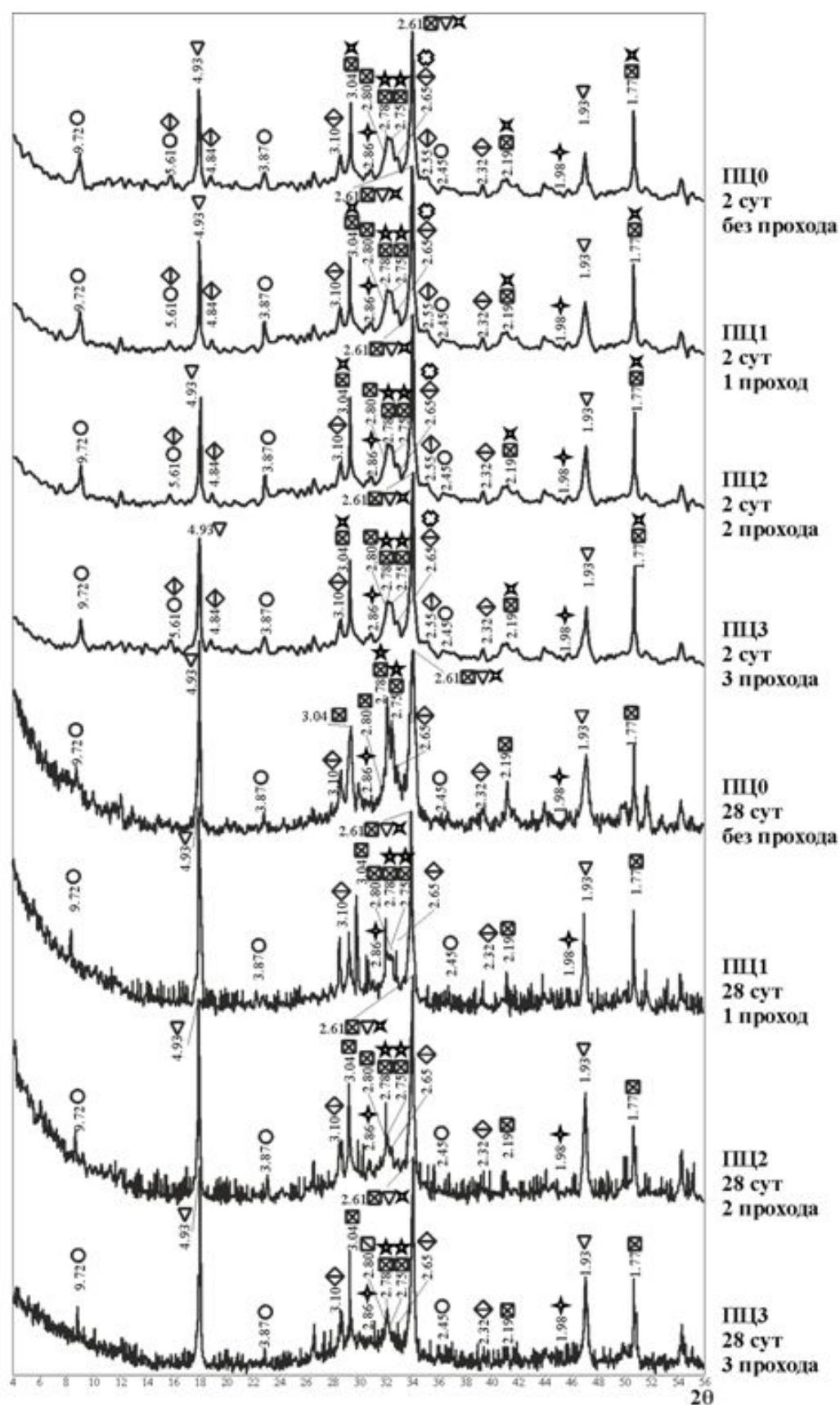
Методом рентгенофазового анализа изучены процессы гидратации портландцементов (рис. 1) и вяжущих композиций, содержащих различное количество минеральной добавки – отходов производства перлитового песка – ОП (от 5 %, 7,5 % и 10 %) в возрастах 2 и 28 суток и полученных в результате механохимической обработки (1, 2 и 3 проходов) в вихревой струйной мельнице. Результаты минерального состава кристаллических новообразований гидратированных портландцементов – ПЦ (1–4, таблица 1) и вяжущих композиций – ВК (5–16, таблица 1), полученных на основе портландцемента и минеральной добавки – отходов производства перлитового песка – ОП представлены на рис. 2–4.

Таблица 1

Свойства вяжущих композиций и цементов

№ составов	Наименование составов	ρ , г/см ³	R _{сж} , МПа	
			через 2 сут	через 28 сут
1	ПЦ0 (без прохода)	2,3	40,1	43,1
2	ПЦ1=>(1 проход)	2,1	46,3	47,2
3	ПЦ2=>(2 проход)	2,1	45,5	49,0
4	ПЦ3=>(3 проход)	2,1	48,4	50,1
5	ВК1.0=>ПЦ/ПП=95/5 % (без прохода)	1,8	13,6	25,8
6	ВК1.1=>ПЦ/ПП=95/5 % (1 проход)	2,0	41,9	51,6
7	ВК1.2=>ПЦ/ПП=95/5 % (2 проход)	2,0	34,8	38,1
8	ВК1.3=>ПЦ/ПП=95/5 % (3 проход)	2,0	42,2	52,0
9	ВК 2.0=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (без прохода)	1,7	6,9	13,2
10	ВК2.1=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (1 проход)	1,9	31,9	38,0
11	ВК2.2=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (2 проход)	2,0	20,0	41,8
12	ВК2.3=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (3 проход)	2,0	23,4	31,6
13	ВК3.0=>ПЦ/ПП=90/10 % (без прохода)	1,6	5,8	13,2
14	ВК3.1=>ПЦ/ПП=90/10 % (1 проход)	1,8	23,8	45,5
15	ВК3.2=>ПЦ/ПП=90/10 % (2 проход)	2,0	15,3	53,3
16	ВК3.3=>ПЦ/ПП=90/10 % (3 проход)	2,0	21,8	47,8

Примечание: индекс в аббревиатуре ПЦ означает количество проходов через вихревую струйную мельницу (0 – без прохода, 1 – один проход, 2 – два прохода, 3 – три прохода); первый индекс в аббревиатуре ВК означает один из вариантов процентного соотношения портландцемента и отходов производства вспученного перлитового песка в составе ВК (1 – соотношение портландцемента и отходов производства вспученного перлитового песка 95/5 %, 2 – 92,5/7,5 %, 3 – 90/10 %); второй индекс в аббревиатуре ВК – количество проходов через вихревую струйную мельницу (0 – без прохода, 1 – один проход, 2 – два прохода, 3 – три прохода)



∇ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$); $\circ$ – $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ($d=9,77; 5,61; 3,87; 2,45 \text{ \AA}$);
 $\diamond$ – C_2AH_3 ($d=5,61; 4,84; 2,55 \text{ \AA}$); $\diamond$ – C_4AH_{13} ($d=3,10; 2,69; 2,32 \text{ \AA}$);
 $\boxtimes$ – CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); $\star$ – $\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}$ ($d=2,78; 2,75 \text{ \AA}$);
 $\star$ – C_3S ($d=3,04; 2,97; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); $\star$ – C_2S ($d=2,86; 1,98 \text{ \AA}$); $\odot$ – C_4AF ($d=2,65 \text{ \AA}$)

Рис. 1. Дифрактограммы гидратированных исходного и механоактивированного цементов ПЦ в возрастах 2 и 28 сут

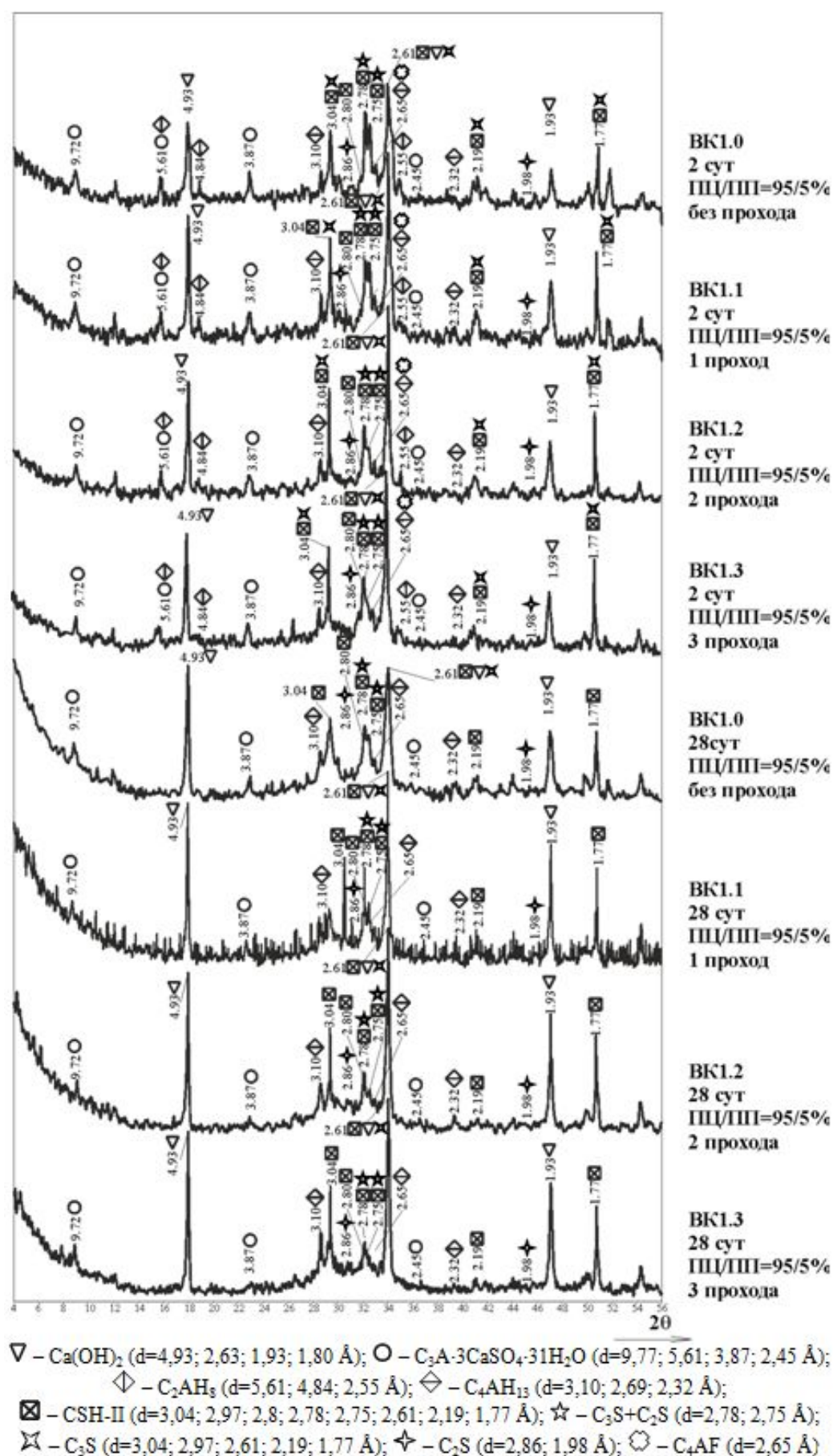


Рис. 2. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 5 %) в возрастах 2 и 28 сут

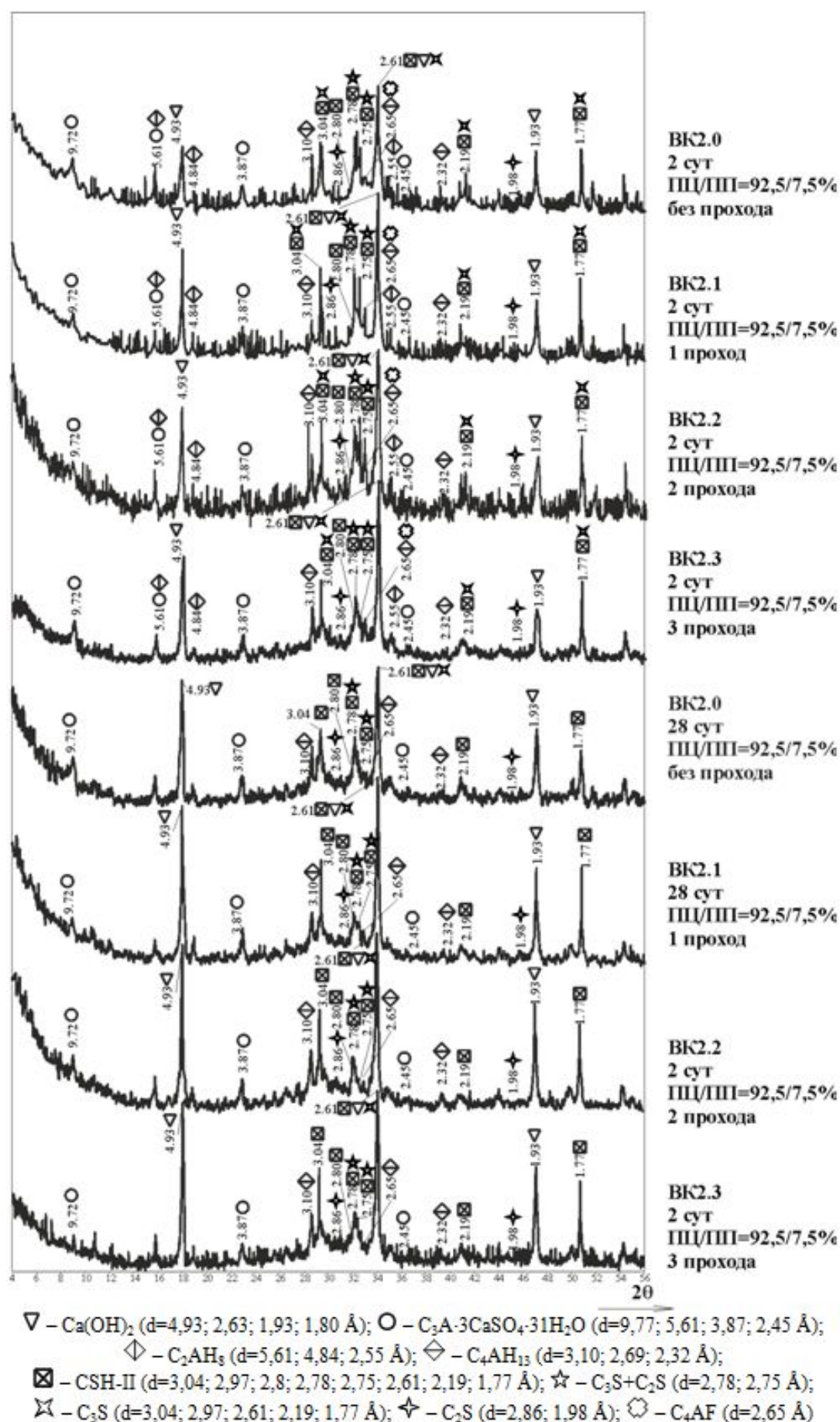


Рис. 3. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 7,5 %) в возрастах 2 и 28 сут

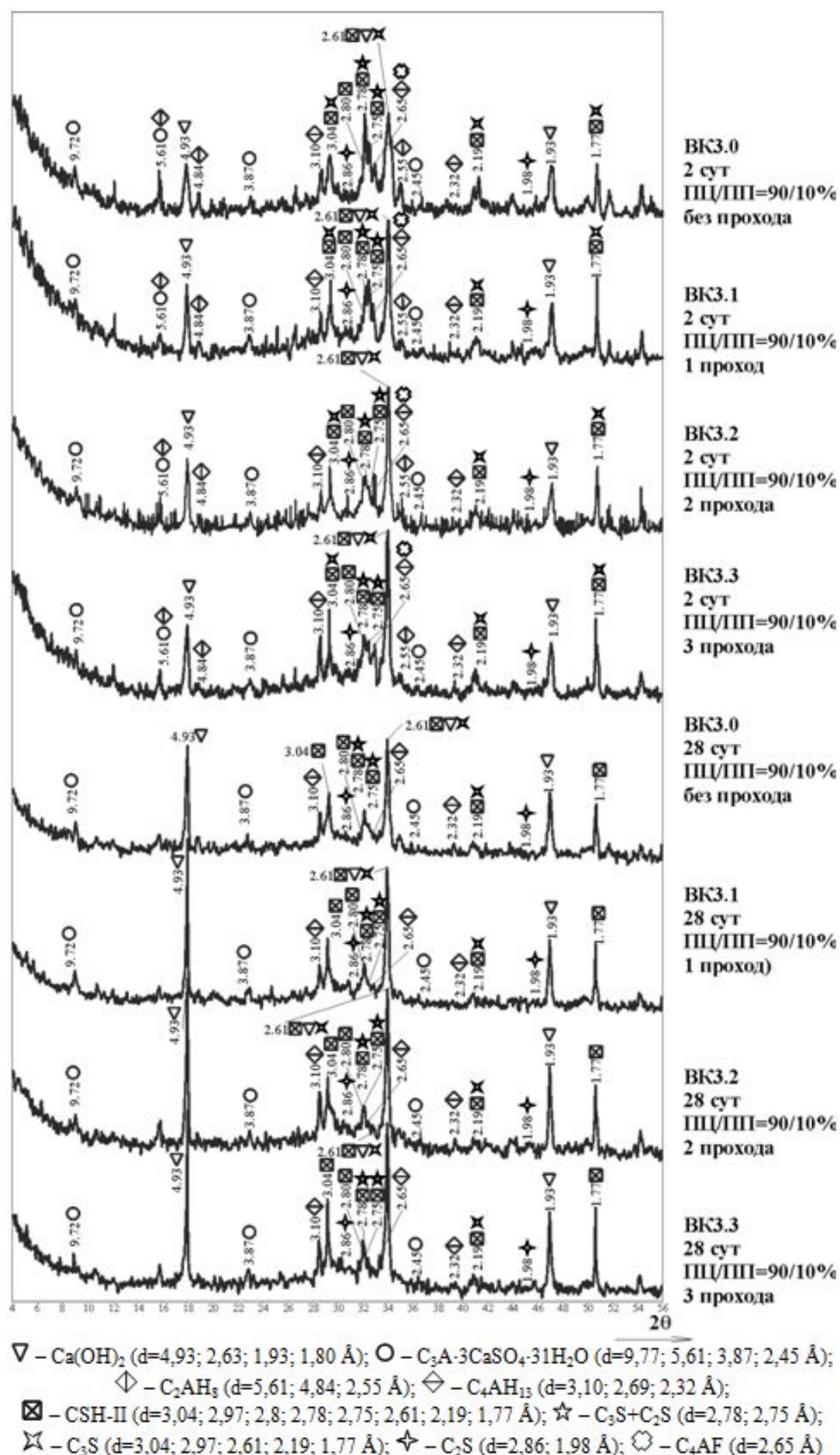


Рис. 4. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 10 %) в возрастах 2 и 28 сут

При анализе рентгенограмм (см. рис. 1) гидратированного цемента начального состава и измельченного (активированного) в вихревой струйной мельнице (ВСМ) при пропуске через рабочую камеру аппарата от одного до трех раз количество портландита, содержащееся в образцах растёт от 10 до 15 % с возрастанием числа проходов через ВСМ, что указывает на возникновение новых поверхностей у частичек минералов для гидратации вследствие механической активации. При увеличении удельной поверхности ПЦ (уд. поверхность исходного ПЦ=350 м²/кг; измельченного один раз = 640 м²/кг; два раза =770 м²/кг; три раза = 930 м²/кг) интенсивность дифракционных максимумов, характерных для высокоосновных гидросиликатов кальция в рассматриваемых системах увеличивается. Во всех составах количество этtringита изменяется незначительно – в диапазоне 1–3 % (рис.1). В ходе экспериментов установили, что к формированию большого количества высокоосновных гидросиликатов кальция приводит механическая активация ПЦ, которая позволяет в 2,5 раза повысить удельную поверхность.

Величина дифракционных максимумов, присущих портландиту в цементах, полученных механической активацией возрастает до 5 %, пропорционально повышению количества проходов при последующей гидратации начального состава ПЦ и ПЦ механоактивированных.

Интенсивность дифракционных максимумов, указывающая на присутствие высокоосновных гидросиликатов кальция в составах, которые подвергались механической активации, увеличивается по сравнению с рядовым ПЦ на 18 %, что свидетельствует об активном формировании новообразований скрытокристаллической структуры, которые уплотняют структуру, что подтверждается результатами физико-механических испытаний (таблица 1). Прочностные характеристики портландцементов, которые подвергались механической активации, возрастают до 15 % по сравнению с исходным ПЦ. Содержание этtringита незначительно повышается с увеличением степени размельчения.

На РФА образцов гидратированных ПЦ, с механоактивацией в ВСМ от одного до трех раз и без наряду с вышеназванными фазами в возрасте 2 сут присутствуют негидратированные фазы алита, белита, четырехкальциевого алюмоферрита и в возрасте 28 сут – белита. Величина дифракционных максимумов портландита и гидросиликатов кальция повышается, что согласуется с результатами физико-механических испытаний образцов.

Изучение дифрактограмм ВК с соотношением ПЦ/ОП=95/5 %, полученных путем измельчения в ВСМ пропуском от одного до трех раз, в возрасте 2-х сут показало, что при повышении количества проходов дифракционные пики, характерные для портландита уменьшаются до 40 %, что можно объяснить повышением удельной поверхности ВК (рис. 2). Интенсивности дифракционных пиков, которые соответствуют возникающим гидросиликатам кальция, в систему увеличивается до 40 % по мере снижения числа проходов в сравнении с не механоактивированной ВК. Увеличение количества проходов рассматриваемых составов не сказывается на изменении содержания этtringита. Усилению начальной скорости гидратации предшествует рост тонкости помола ВК.

При достижении 28 суток твердения интенсивность дифракционных пиков портландита повышается до 20 % в зависимости от количества проходов в ВСМ, а интенсивность дифракционных максимумов, характерных для гидросиликатов кальция возрастает до 35 % при одном проходе в сравнении с начальным составом вяжущей композиции, прочностные характеристики ВК активированных в мельнице возрастают до 50 % по сравнению с ВК рядовой (не измельченной). Количественное содержание этtringита остается на том же уровне.

Почти все активные рефлексы образцов через 2 сут соответствуют кристаллическим не взаимодействующим фазам ПЦ, но, ряд интенсивностей можно отнести к высокоосновным гидросиликатам кальция.

Взаимодействия, проходящие на границе раздела фаз ЦП–минеральная добавка, имеют топочимический характер. Минеральная добавка в количестве 5 % через 28 суток приводит к большому повышению прочности на сжатие в сравнении с рядовым составом ПЦ (не измельченным), из-за значительного содержания кристаллогидратов, которые имеют значительное влияние при образовании кристаллического скелета гидратированного ПЦ.

Исследование дифрактограмм ВК (ПЦ/ОП=92,5/7,5 %), измельченных в ВСМ от одного до трех раз, через 2 сут показал, что дифракционные пики, свойственные портландиту, возрастают на 45 % при снижении числа проходов. Данное явление можно объяснить высокой дисперсностью состава и большой поверхностью для прохождения реакций; интенсивность пиков, характерных для гидросиликатов кальция увеличивается до 30 % при снижении количества проходов. Количественное содержание этtringита не меняется, оставаясь на прежнем уровне (рис. 3).

Дифракционные пики портландита в возрасте 28 сут повышаются на 30 % при росте числа проходов в ВСМ. Со снижением числа проходов рост числа вторичных гидросиликатов кальция составляет 30 %, что можно объяснить сложнейшими взаимодействиями гидросиликатов кальция и гидроалюминатов кальция, находящихся в системе, и излишним числом поверхностей образуемых минеральной добавкой.

Анализ показывает, что физико-механические характеристики вяжущих композиций после механоактивирования при соотношении компонентов цемент – отходы производства = 92,7 – 7,5 % возрастают на 58 % в сравнении с исходной вяжущей композицией.

Изучение рентгенограмм вяжущих композиций в ранние сроки твердения – 2 сут, предварительно активированных в вихревой струйной мельнице при соотношении сырьевых компонентов: цемент – ОП = 90 – 10 % свидетельствует, что величина основного максимума дифрактограммы гидросиликатов кальция возрастает до 48% в сравнении с неактивированной вяжущей композицией аналогичного состава (рис. 4).

В 28-суточном возрасте в вяжущих композициях одинакового состава отмечается присутствие тех же фаз, отмеченных выше. Присутствие портландита с возрастанием активационной обработки снижается до 41 %, а величина дифракционных максимумов, присущих гидросиликатам кальция возрастает на 28 %. Отмечается, что эттрингит содержится в постоянных количествах в исследуемых вяжущих композициях.

Проведенный рентгенофазовый анализ позволил установить, что с увеличением присутствия доли отходов производства вспученного перлитового песка в исследуемых вяжущих композициях с содержанием до 10 % на состав новообразований не влияет.

Диаграммы, приведенные на рис. 5 отражают сравнительные результаты по наличию и интенсивности основных минеральных фаз во всех исследуемых вяжущих композициях и портландцементных, полученных при активизации в помольном агрегате.

Проведенный сравнительный анализ исследуемых вяжущих композиций, активированных в струйной мельнице при разных активационных режимах и различной дозировке минеральной добавки и цемента, при гидратации их в возрасте 2 и 28 сут показали определенные особенности:

– в 2-х суточном возрасте сравнение рентгенограмм механоактивированных цементов и обычного портландцемента выявили, что содержание основных фаз примерно одинаковое $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$, C_4AH_{13} , C_2AH_8 , $Ca(OH)_2$, CSH-II. При этом предел прочности при сжатии

вяжущих композиций возрастает в возрасте 2 сут до 13%, а к 28 сут – до 15%, что присуще всем вяжущим композициям, объясняемое формированием более плотной структуры за счет высокой удельной поверхности частиц вяжущей композиции;

– установлено, что при меньшем числе проходов вяжущих композиций возрастает количество портландита, одновременно увеличивается содержание гидросиликатов кальция, что можно объяснить повышенным содержанием в системе высокодисперсных минеральных частиц – отходов производства. К возрасту 28 сут в вяжущих композициях возникают скрытокристаллические новообразования по всему объему, отмечается наличие значительного количества минеральных подложек из отходов производства вспученного перлитового песка, на которых формируются кристаллические сростки и прорастают по всему объему композита, что отчетливо видно на микрофотографиях;

– вяжущая композиция, содержащая 7,5 % вспученного перлитового песка, при возрастании удельной поверхности, содержит портландита до 29 %, а гидросиликатов кальция до 20 %, данное обстоятельство указывает на формирование в системе сложных скрытокристаллических процессов, что отражается на увеличении физико-механических показателей образцов вяжущей композиции на 52 % к возрасту 28 сут;

– при содержании в вяжущей композиции до 10 % вспученного перлитового песка показало, что с уменьшением механоактивации наблюдается повышенное содержание гидросиликатов кальция на 28 %, при содержании количества портландита до 41 %. В этих составах прочность увеличивается почти в два раза, что объясняется формированием субмикрокристаллической структуры на частичках перлитового песка, как на подложках, при этом формируются микрокристаллы, прорастая в межзерновом пространстве, заполняя поры и пустоты.

Проведенные исследования свидетельствуют, что все вяжущие композиции представлены основными продуктами гидратации, характерными для портландцемента: C_2AH_8 , $Ca(OH)_2$, C_4AH_{13} , CSH-II, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$. Следует отметить, содержание этих фаз в различных составах отлично, что можно объяснить формированием сложной субмикрокристаллической структурой, обусловленной присутствием высокодисперсных отходов перлитового производства, а также их количества и особенностью их распределения в объеме материала, вследствие особенностей структуры.

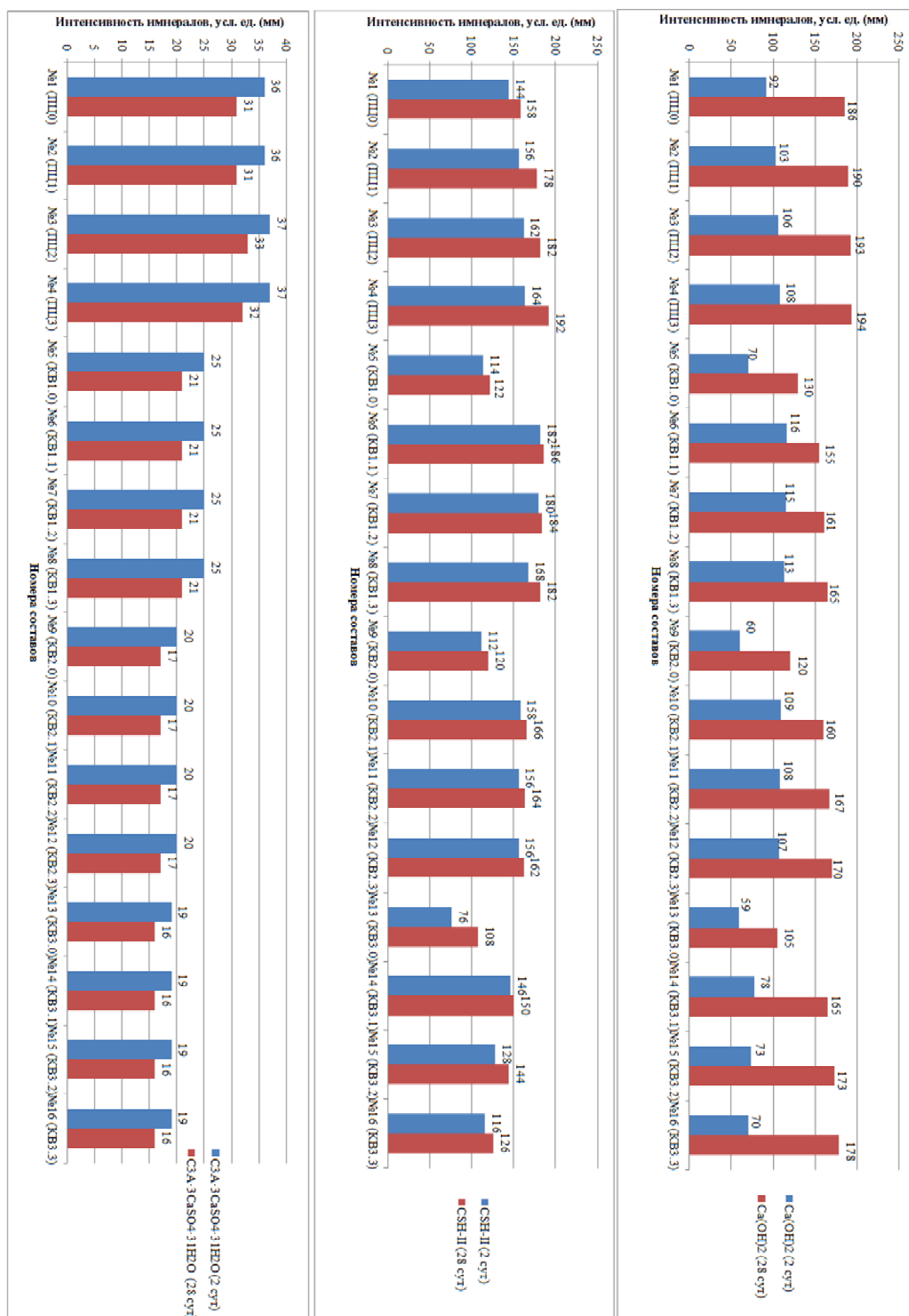


Рис. 5. Интенсивности основных дифракционных максимумов в условных единицах (мм) портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, гидросиликатов кальция CSH-II и этtringита $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Установлена наиболее рациональная вяжущая композиция по составу (№6), механоактивации и максимальной прочностью при сжатии в 28 суточном возрасте – 69,1 МПа. Данную вяжущую композицию целесообразно рекомендовать для последующих исследований при получении теплоизоляционных растворов.

Комплексные исследования продуктов гидратации методом рентгенофазового анализа и

электронной микроскопии (рис. 6) свидетельствуют, что использование высокодисперсных отходов производства вспученного перлитового песка в вяжущих композициях позволяет увеличить содержание гидратных новообразований, вследствие повышения степени гидратации основных клинкерных фаз, а также из-за пуццоланической активности этих отходов.

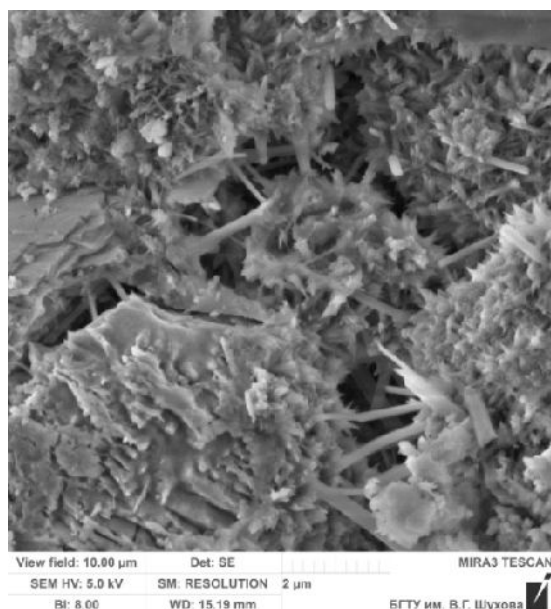


Рис. 6. Микрофотографии вяжущих композиций в возрасте 28 сут состава портландцемент-отходы производства вспученного перлитового песка = 95–5 %, механоактивированные один раз в вихревой струйной мельнице

Установлено, что при твердении цементных вяжущих композиций, приготовленных с использованием различного количества минеральных отходов – вспученного перлитового песка имеют место основные процессы, присущие классической гидратации обычного портландцемента.

Отмечается, что используемая минеральная добавка не влияет на последовательность основных химических взаимодействий в системе, но при этом скорость протекания реакции увеличивается.

Повышение реакционной способности в системе вяжущих композиций объясняется комплексным действием минеральных добавок, оказывающих на первом этапе разобшающее действие в системе, так как вначале они работают, как мельчайший наполнитель, разбивая цементные частицы и обеспечивая доступ воды к ним, и на втором этапе, работают как гидравлическая добавка, поглощая $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из данной системы и выводя гидроксид кальция из реакционной сферы, ускоряя этим процесс гидролиза C_3S и C_2A .

Выводы. Таким образом, при твердении цементных вяжущих композиций, приготовленных

с использованием различного количества минеральных отходов – вспученного перлитового песка имеют место основные процессы, присущие классической гидратации обычного портландцемента, а также особенности, обусловленные формированием высокоосновных гидратных новообразований и интенсивным протеканием ионообменных процессов с участием перлитовой минеральной добавки.

Источник финансирования. РФФИ научно-исследовательского проекта № 18-29-24113 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate // Journal of the American Ceramic Society. 2017. Т. 100. № 3. С. 1178–1194.
2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. Т. 12. № 2. С. 12.

3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement // *ACS Omega*. 2018. T. 3. № 5. P. 5092–5105.
4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. T. 100. № 7. C. 2746–2773.
5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain quartz and silicate dissolution behavior // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2005. T. 102. № 25. C. 15357–15362.
6. Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials // *Life Science Journal*. 2014. № 11. C. 948–953.
7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Volodchenko A.N. and Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers. *Research journal of applied sciences*. 2015. № 10. C. 931–936.
8. Комохов П.Г., Шангина Н.Н. Модифицированный цементный бетон его структура и свойства // *Цемент и его применение*, 2002. №1. С. 43–46.
9. Сумской Д.А., Загороднюк Л.Х., Жерновский И.В. Особенности формирования кристаллических новообразований в вяжущих композициях в зависимости от технологии их приготовления // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 6. С. 71–78.
10. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Шамшуrow А.В., Беликов Д.А. Композиционные вяжущие на основе органо-минерального модификатора для сухих ремонтных смесей // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2014. № 5. С.25–31.
11. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. № 9. C. 816–819.
12. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // *Hydration kinetics and rheological behavior // Construction and Building Materials*. 2018. T. 184. C. 304–310.
13. Matakah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. T. 151. C. 127–138.
14. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 196. P. 1478–1485.
15. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders // *JianzhuCailiaoXuebao / Journal of Building Materials*. 2013. T. 16. № 1. C. 43–49.
16. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizers equipped with hyperbranched polyamide teeth // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. № 553. C. 272–277.
17. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnuk L.H., Volodchenko A.N. and Prasolova E.O. Influence Of The Inorganic Modifier Structure On Structural Composite Properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. T. 10. № 19. C. 40617–40622.
18. Строкова В.В., Жерновский И.В., Нелюбова В.В., Сумин А.В. Фазовые трансформации при гидратации модифицированного цементного камня // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. Т. 8. № 5-1. С. 199–204.
19. Сумской Д.А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. №2. С. 283–289.
20. Демьянова В.С., Калашников В.И., Борисов А.А. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах // *Жилищное строительство*. 1999. № 1. С. 17–18.
21. Терликовский Е.В., Третник В.Ю. Использование механической активации для модифицирования неорганических материалов // *Тезисы докладов V Всесоюзного семинара 8–10 сентября 1987 г. Таллин*. 1987. С. 27–28.

Информация об авторах

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

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

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

Рыжих Владислав Дмитриевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.10.2020 г

© Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д., 2020

Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., *Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: pr9nik2011@yandex.ru*

FEATURES OF THE PROCESSES OF HYDRATION OF BINDING COMPOSITIONS USING WASTE OF EXPANDED PERLITE SAND

Abstract. The results of studying the processes of hydration of binder compositions obtained at different ratios of cement and waste of expanded perlite sand (from 5 to 10 %), in a vortex jet mill, under different modes of mechanical and chemical activation – from one to three passes are presented. Comprehensive studies of hydration products by X-ray phase analysis and electron microscopy indicate that the use of highly dispersed wastes from the production of expanded perlite sand in binding compositions allows an increase in the content of hydrated neoplasms due to an increase in the degree of hydration of the main clinker phases, as well as due to the pozzolanic activity of these wastes. The contact zone between the hydrated compounds and the remnants of the grains of the original cements has a special effect on the formation of a high-strength structure of the cement stone. The structure formation of a cement stone depends on a number of factors, which can be influenced by various technological methods. When designing compositions of cement composites, it is necessary to ensure that hydration products in the created system are present along with low-basic calcium hydrosilicates and high-basic ones. Their ratio should be such that carbonization does not reduce the volume of the formed crystalline phase of the cement stone. The composition of the hydration products determines the level of supersaturation of the solution, the type and number of impurities soluble in water, the duration of the hydration process, etc. The chemistry of the reactions of the hydrated system changes accordingly. It is found that the intensity of the diffraction maxima, indicating the presence of highly basic calcium hydrosilicates in the compositions that underwent mechanical activation, increases by 18 % in comparison with the ordinary PC. The strength characteristics of Portland cements, which have undergone mechanical activation, increase up to 15 % compared to the original PC. The most rational binder composition is established in terms of composition (No. 6), mechanical activation and maximum compressive strength at 28 days of age – 69,1 MPa.

Keywords: binding composition, waste of expanded perlite sand. x-ray phase analysis, hydration processes, portlandite, calcium hydrosilicates, ettringite, microstructure.

REFERENCES

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 3. Pp. 1178–1194.
2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 12.
3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement. *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. No. 5. Pp. 5092–5105.
4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 7. Pp. 2746–2773.
5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain quartz and silicate dissolution behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. No. 12. Pp. 3111–3116.

States of America. 2005. Vol. 102. No. 25. Pp. 15357–15362.

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

7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers. *Research journal of applied sciences*. 2015. No 10. Pp. 931–936. (rus)

8. Komokhov P.G., Shangina N.N. Modified cement concrete, its structure and properties [Modifitsirovanny tsementnyy beton ego struktura i svoystva]. *Cement and its application*. 2002. No. Pp. 43–46. (rus)

9. Sumskey D.A., Zagorodnyuk L.Kh., Zhernovskiy I.V. Features of the formation of crystalline neoplasms in binding compositions depending on the technology of their preparation [Osobennosti formirovaniia kristallicheskikh novoobrazovaniy v viazhushchikh kompozitsiyakh v zavisimosti ot tekhnologii ikh prigotovleniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 6. Pp. 71–78. (rus)

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

11. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. No. 9. Pp. 816–819. (rus)

12. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of CSH and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques. Hydration kinetics and rheological behavior. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 184. Pp. 304–310.

13. Matalkah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 151. Pp. 127–138.

14. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 196. Pp. 1478–1485.

15. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders. *Jianzhu Cailiao Xuebao. Journal of Building Materials*. 2013. Vol. 16. No. 1. Pp. 43–49.

16. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizer equipped with hyperbranched polyamide teeth. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. No. 553. Pp. 272–277.

17. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Prasolova E.O. Influence Of The Inorganic Modifier Structure On Structural Composite Properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 19. Pp. 40617–40622. (rus)

18. Stokova V.V., Zhernovskiy I.V., Nelyubova V.V., Sumin A.V. Phase transformations during the hydration of modified cement stone [Fazovye transformatsii pri gidratatsii modifitsirovannogo tsementnogo kamnia]. *Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 8. No. 5-1. Pp. 199–204. (rus)

19. Sumskey D.A. Thermal insulation solution based on a composite binder [Teploizoliatsionnyi rastvor na osnove kompozitsionnogo viazhushchego]. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol. 80. No. 2. Pp. 283–289. (rus)

20. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Borisov A.A. On the use of dispersed fillers in cement systems [Ob ispolzovanii dispersnykh napolnitelei v tsementnykh sistemakh]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 1999. No. 1. Pp. 17–18. (rus)

21. Terlikovsky E.V., Tretnik V.Yu. The use of mechanical activation for the modification of inorganic materials [Ispolzovanie mekhanicheskoi aktivatsii dlia modifitsirovaniia neorganicheskikh materialov]. *Abstracts of the V All-Union Seminar 8–10 September 1987 Tallinn*. 1987. Pp. 27–28. (rus)

Information about the authors

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

Rakhimbaev, Shark M. DSc, Professor. E-mail: zagorodnyk.lh@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

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

Ryzhikh, Vladislav D. Postgraduate student. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.10.2020

Для цитирования:

Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 75–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88

For citation:

Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D. Features of the processes of hydration of binding compositions using waste of expanded perlite sand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 75–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-89-101

Кочергин Ю.С., Носова А.Н., Кравчук Т.Н., Григоренко Т.И., *Золотарева В.В.

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского

*E-mail: viktoria802@gmail.com

СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, ОТВЕРЖДЕННЫХ КОМПЛЕКСОМ ОЛОВООРГАНИЧЕСКОГО ГАЛОГЕНИДА С АМИНОФЕНОЛЬНЫМ ОТВЕРДИТЕЛЕМ

Аннотация. Разработан способ синтеза комплекса на основе оловоорганического галогенида – дибромид дибутилолова – и аминокфенольного отвердителя марки УП-583. Установлено, что образцы, отвержденные комплексным отвердителем при комнатной температуре, характеризуются меньшими значениями прочности при растяжении, модуля упругости и температуры стеклования по сравнению с образцами, отвержденными отвердителем УП-583. Значения деформации при разрыве примерно одинаковы для обоих отвердителей. После термообработки для образцов, содержащих комплекс, резко возрастают значения прочности и модуля, вследствие чего они превосходят образцы на основе УП-583. Деформационная способность при этом изменяется мало, а температура стеклования, хотя и возрастает после прогрева, но все равно остается значительно меньшей, чем у образцов, отвержденных УП-583. Наблюдаемое изменение деформационно-прочностных свойств образцов при их экспозиции в жидкой среде объяснено наложением эффектов пластифицирования и доотверждения эпоксидных полимеров. При малых временах экспозиции действие сорбируемой влаги (или другой физически активной жидкости) направлено главным образом на ослабление межмолекулярного взаимодействия в образце, вследствие чего снижается его прочность и растет деформативность. При больших значениях $t_{\text{в}}$, когда количество поглощенной воды становится достаточно большим и развивается довольно интенсивная молекулярная подвижность, преобладают процессы доотверждения, приводящие к увеличению плотности поперечного сшивания и, как следствие, к снижению деформационной способности и росту показателя прочности. Показано, что эпоксидные композиты, содержащие комплексный отвердитель, отличаются хорошей работоспособностью в водной среде, повышенной стойкостью к развитию грибка и плесени, а также лучшей огнестойкостью. Исследованные полимеры являются перспективными для получения на их основе противообрастающих покрытий для гидротехнического оборудования, морских и речных судов.

Ключевые слова: эпоксидный композит, аминокфенольный отвердитель, комплекс, оловоорганический галогенид, деформационно-прочностные свойства, температура стеклования, водостойкость, огнестойкость, противообрастающие покрытия.

Введение. Обрастание водорослями и моллюсками является одной из основных проблем, затрагивающих промышленные теплообменники с использованием воды из природных источников (озер, рек и морей) для охлаждения. Негативными последствиями формирования обрастания являются сокращение передачи тепла, потеря эффективности охлаждения, преждевременный износ объектов и увеличение расходов на эксплуатацию и техническое обслуживание [1–3]. Обрастание накапливается до тех пор, пока не начинает отрываться и уноситься к решеткам, трубным щитам и помпам. Происходящая при этом закупорка приводит к повышению давления до критического. При этом возникают непредвиденные расходы, связанные с перекрытием водоводов для их очистки. Установлено, что обрастание днищ судов снижает их скорость (до 50 %), увеличивает потребление топлива (до 40 %), а также повышает массу гидротехнических сооружений (до 20 %), нарушает работу выводов платформ для добычи нефти и газа на шельфе.

Современные методы борьбы с обрастанием подразделяются на физические и химические. Использование теплой воды является одним из наиболее распространенных физических методов борьбы с обрастанием водоводов. Этот метод особенно выгоден в тех случаях, когда имеются отходы тепловой энергии, поскольку подогрев воды в больших количествах требует много средств. Для защиты водоводов от обрастания рекомендовано также использование защитных электрофильтров, суть действия которых состоит в создании на входе в водовод электрического поля. При достаточной плотности тока (25 мА/см²) и напряжении (220–280 В) личинки обрастателей, проникающие в водовод, окажутся убитыми или парализованными [4]. Рядом авторов предлагается осуществлять защиты водоводов от обрастания при помощи ультразвука [1]. Показано, что гибель личинок обрастателей зависит от частоты и давления ультразвуковых волн. Когда величина давления ультразвука достигает 0,1 – 0,3 бар, то процент гибели личинок зависит

от времени воздействия. При постоянной пульсации увеличение частоты вызывает повышение гибели личинок. Возможно использование для защиты водоводов также катодной защиты [1].

Среди химических методов защиты довольно широкое применение получили антиобрастающие полимерные покрытия [5, 6]. Любая эффективная необрастающая краска обычно представляет собой комбинацию из четырех основных ингредиентов: биоцида, полимера, растворителя и пигмента. Биоцид представляет собой смесь активных веществ (ядов), препятствующих биологическому обрастанию. Полимер – это связующее, создающее на защищаемой поверхности пленку, удерживающую компоненты краски. Растворитель определяет текучесть краски и скорость ее высыхания. Пигмент придает покрытию нужный цвет. По типу полимерного связующего необрастающие краски можно разделить на два основных типа: эродирующие (их еще называют самополирующимися) и твердые. Первые способны медленно растворяться в воде. Постепенно смывая верхние слои такой краски, вода постоянно «освежает» необрастающее покрытие. В результате внешний слой краски всегда содержит высокую концентрацию биоцидов. Твердые необрастающие краски не смываются водой и сохраняют твердость во время эксплуатации судов и гидротехнических сооружений. Механизм их защитного действия основан на выщелачивании биоцида в количестве приблизительно пропорциональном его содержанию в лакокрасочной пленке.

Классическим примером является применение в защитных покрытиях, препятствующих обрастанию днищ кораблей от морских наростов, в качестве биоцида порошкообразной меди и ее оксида. Применяются также другие металлы и их соли, в первую очередь, олово [7]. Оловоорганические полимеры обладают высокой антимикробной и антигрибковой активностью [8–10].

В состав связующих, используемых в судостроении, часто вводят галогенсодержащие полимеры, которые предназначены для повышения огнестойкости компонентов [11].

Эффективными биоцидами являются оловоорганические галогениды (ООГ), благодаря чему они получили широкое применение в качестве антимикробных и антигрибковых добавок для лакокрасочных материалов. В отличие от оксидов металлов добавки ООГ в полимерные материалы не вызывают вторичных коррозионных эффектов. При этом в морской воде ООГ легко разлагаются на неопасные для фауны моря продукты. В настоящее время также известно применение ООГ в качестве катализаторов отверждения эпоксид-

ных смол и латентных отвердителей каталитического действия. Введение каталитических количеств ООГ в эпоксидные композиции позволяет снизить температуру отверждения, а материалы, полученные на основе этих композиций, обладают хорошими деформационно-прочностными и адгезионными свойствами [12]. Также известно, что эпоксидные композиции, содержащие галогены, обладают пониженной горючестью, при этом минимальное содержание галогена, необходимое для снижения горючести эпоксидных материалов составляет 13–15 % и 26–30 % соответственно хлора и брома [13–20]. Следует, однако, иметь в виду, что высокие концентрации галогеносодержащих соединений приводят к ухудшению физико-механических свойств полимера. Для снижения этого нежелательного эффекта применяют синергетические смеси, представляющие собой смеси галогеносодержащих соединений с неорганическими соединениями [21–23]. С этой точки зрения оловоорганические галогениды – перспективные соединения. Кроме своей основной функции в эпоксидной композиции, функции отвердителя, алкил (арил) оловогалогениды сами по себе представляют синергетическую пару: атомы олова и галогена.

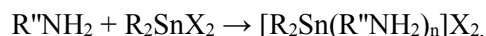
Применение ООГ для создания олово- и галогенсодержащих эпоксидных материалов в доступной литературе описано весьма скупо. Известно применение ООГ в качестве реагентов для синтеза оловосодержащих отвердителей для эпоксидных смол [24]: отвердители получают взаимодействием R_2SnX_2 и R_2SnO с карбоновыми кислотами и ангидридами. Содержание олова в таких отвердителях достигает 10 %. Однако, такие отвердители не являются галогеносодержащими, поскольку в ходе реакции выделяется галогеноводородная кислота. Применение ООГ в качестве сшивающих агентов для эпоксидных смол имеет несколько недостатков: отверждение проводится при высоких температурах 150–180 °С, а полученные при этом материалы обладают высокой хрупкостью и малой прочностью. По этой причине при создании сшивающих агентов для эпоксидных смол на основе оловоорганических галогенидов актуальной является задача повышения их реакционной способности и тем самым снижения температуры отверждения системы.

Известные комплексы ООГ с аминами для отверждения эпоксидных смол не пригодны в основном из-за плохой совместимости с эпоксидными смолами. Низкоактивные отвердители, содержащие в своем составе атом азота, олова и галогена описаны авторами работы [25]. В качестве

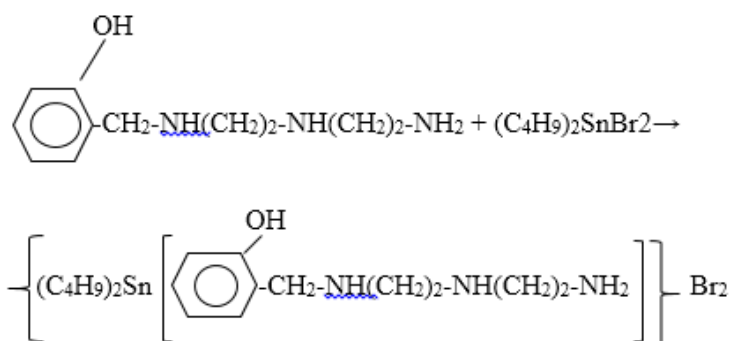
отвердителей используются бис- (2-хлор-5-аминобензоат)-тетрабутилдиоксан и бис- (2-хлор-5-аминобензоат)-тетрабутилдистаннан.

Композиции с такими отвердителями отверждаются при 150 °С в течение 14 часов. Содержание олова в композициях составляет 4–7 %, галогена 3–5 %, что недостаточно для создания материалов с пониженной горючестью.

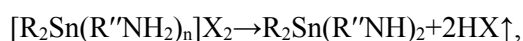
Получить эпоксидные композиции со значительно большим содержанием олова и галогена нам удалось с использованием комплексов ООГ с аминами. Синтез комплексов заключается во взаимодействии аминов с ООГ по схеме:



где $n=1$ или 2 .



Выход комплекса составляет 90%. Состав и строение полученного олово- и галогеносодержащего аминного отвердителя подтверждены элементным анализом (C-37,41; H-6,40; Sn-20,82; Br-28,23; N-6,41 %) и методом ИК- спектроскопии. ИК-спектр комплексного соединения, полученного при смешении эквимольных количеств Bu_2SnBr_2 и УП-583, отличается от спектров исходных соединений. Наблюдается исчезновение полос поглощения в области 1380 см^{-1} , смещение и изменение интенсивности полос в области 1280 и 2200 см^{-1} . Одновременно, появляются новые полосы поглощения в области 1100 и 3150 см^{-1} , причем последняя может быть отнесена к связи Sn-N [26]. Образование комплекса подтверждено также методом термогравиметрии. Так, на кривой ДТА в интервале температур $70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для комплекса появляется эндотермический пик, относящийся, по-видимому, к плавлению комплекса. В области $190\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается экзотермический пик, который можно отнести к образованию комплекса новой структуры и сопровождающийся выделением галогенводорода:



поскольку при температуре $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит переход экзопика в эндопик с мгновенной потерей веса до 100 %.

В свете изложенного целью настоящей работы явилось исследование физико-механических и релаксационных свойств эпоксидных композиционных материалов, отвержденных комплексом оловоорганического галогенида с аминным отвердителем.

Методология. В качестве объектов исследования выбраны эпоксидные полимеры на основе диглицидилового эфира бисфенола А, которые получали отверждением промышленной смолы марки ЭД-16 с массовой долей эпоксидных групп 17,3 % и молекулярной массой 495. Отвердителем служили аминифенольный отвердитель марки УП-583 и его комплекс с ООГ, который получали взаимодействием УП-583 с дибромидом дибутилолова по схеме:

Отверждение композиций проводили по режимам $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч}$ (отверждение без подвода тепла извне, т.е. при комнатной температуре) и $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч} + 120\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ ч}$ (отверждение с термообработкой). Объекты исследования представляли собой пленки толщиной $100\text{--}150\text{ мкм}$, полученные при отверждении полимерных композиций между двумя полированными поверхностями металлических плит, покрытых тонким слоем антиадгезива.

Термомеханические исследования пленочных образцов проводили на установке [27] при постоянной растягивающей нагрузке 1 МПа . Механические свойства при одноосном растяжении (разрушающее напряжение σ_r и деформация при разрыве ε_r определяли на приборе типа Поляни с жестким динамометром и автоматической регистрацией измеряемых величин [26]. Скорость деформирования составляла $3,83 \cdot 10^{-5}\text{ м/с}$. Модуль упругости E рассчитывали по наклону начального участка кривой $\sigma - \varepsilon$. Водопоглощение W определяли по приращению массы пленочных образцов после выдержки в воде в течение 24 ч. Плотность образцов ρ измеряли методом градиентной колонки по ГОСТ 15139-69. Оценку устойчивости композита к воздействию плесени проводили по ГОСТ 9.048-89 «Единая система

защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов». В испытаниях использован метод 2. Сущность метода заключается в том, что изделие без очистки от внешних загрязнений заражают водной суспензией спор грибов и выдерживают в условиях, оптимальных для их развития, в течение 28 сут. Кислородный индекс определяли по ГОСТ 21793-76. Электронно-микроскопические исследования проводили на электронном микроскопе УЭМВ-100К методом двухступенчатых реплик с хрупкого скола. В качестве первичной реплики использовали 2% раствор желатины, на которую затем напылялась угольно-палладиевая реплика. Молекулярную массу участка цепи между узлами химической сетки (M_c) определяли по величине равновесной деформации ползучести, измеренной при температуре $T = T_c + 50$ К, по формуле:

$$M_c = 3\rho RT\varepsilon_0/\sigma_0$$

где: R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; ρ – плотность полимера; ε_0 – равновесная деформация; σ_0 – постоянное приложенное напряжение.

Плотность узлов химической сетки n_c рассчитывали по формуле:

$$n_c = \rho / M_c$$

Основная часть. Как видно из рис. 1, образцы, отвержденные комплексным отвердителем при комнатной температуре, характеризуются существенно меньшими значениями прочности при растяжении, модуля упругости и температуры стеклования по сравнению с образцами, отвержденными исходным отвердителем УП-583. Значения деформации при разрыве примерно одинаковы для обоих отвердителей. После термообработки для образцов, содержащих комплекс, резко возрастают значения σ_p и E , вследствие чего они превосходят образцы на основе УП-583. Показатель ε_p при этом изменяется мало, а величина $T_{ст}$, хотя и возрастает после прогрева, но все равно остается значительно меньшей, чем у образцов, отвержденных исходным УП-583. Причина такого изменения свойств заключается, на наш взгляд, в следующем. При образовании комплекса происходит увеличение длины молекулы отвердителя, насыщение ее тяжелыми атомами олова и брома, и «экранирование» первичных аминных групп атомами брома, что существенно замедляет скорость химической реакции между аминными группами отвердителя и оксирановыми циклами эпоксидной смолы. В результате при отверждении без подвода тепла извне образуется более редкая химическая сетка, которая характеризуется меньшими значениями σ_p и

E . При этом определенный вклад в величины этих параметров вносит физическая сетка, образованная межмолекулярным взаимодействием водородных групп эпоксидной смолы и атомов брома комплексного отвердителя. Термообработка образцов при 120 °С приводит к разрушению этой физической сетки и усилению подвижности молекул, благодаря чему происходит образование дополнительных химических сшивок за счет реакции непрореагировавших при комнатной температуре эпоксидных и аминных групп.

В образующейся в результате более плотной химической сетке, благодаря сближению молекул возрастает вероятность образования водородных связей между ОН-группами и атомами брома. При этом при невысоких температурах (ниже $T_{ст}$) из-за наличия тяжелых атомов олова и брома флуктуация этих межмолекулярных связей будет меньше, чем в случае композиций, отвержденных УП-583. Поэтому вклад межмолекулярного взаимодействия в увеличение σ_p и E для комплексного отвердителя выше. При повышении температуры физическая сетка разрушается в первую очередь, а более редкая химическая сетка в меньшей степени сопротивляется механической нагрузке. Это находит свое отражение в меньшей величине $T_{ст}$ (рис. 1г) и более быстром уменьшении прочности при растяжении (рис. 2, кривая 2) и значительном увеличении деформации при разрыве (рис. 3, кривая 2) для образцов, отвержденных комплексом оловоорганического галогенида с отвердителем УП-583.

Поскольку оловосодержащие полимеры предназначены, в первую очередь, для защиты от обрастания гидротехнических сооружений и механизмов, работающих в водной среде, а также морских и речных судов представляло интерес исследовать влияние воды и других жидких сред на их деформационно-прочностные свойства. Видно (рис. 4), что параметр σ_p сложным образом зависит от времени выдержки (t_b) образца в воде. При малых временах t_b (около 24 ч) для образца, отвержденного исходным УП-583, наблюдается уменьшение σ_p на 10 % (отверждение без подогрева) и на 33,7 % для термообработанного композита. Для образцов, отвержденных комплексом, снижение σ_p для непрогретого и термообработанного образцов примерно одинаково (15,5 и 14,7 % соответственно). После достижения точки минимума происходит рост прочности с образованием максимума при $t_b=360$ ч для образцов, отвержденных исходным УП-583, независимо от режима отверждения. При этом в точке максимума величины σ_p превосходят начальные значения на 34,4 % для непрогретого образца и на 45,0 % для термообработанного образца. После

максимума σ_p достаточно быстро снижается, достигая через 720 ч значений, примерно таковых, как у исходных образцов (при $t_B=0$). Для композитов, отвержденных комплексом, довольно слабый максимум наблюдается только для термообработанного образца (при $t_B=240$ ч). При этом величина σ_p в точке максимума ниже на 5 %, чем

начальное значение прочности. Для непрогретого образца максимум σ_p в исследованном интервале времен экспозиции (720 ч) не наблюдается. Имеет место только монотонный рост σ_p до значений на 62 % выше, чем у исходного образца при $t_B=0$

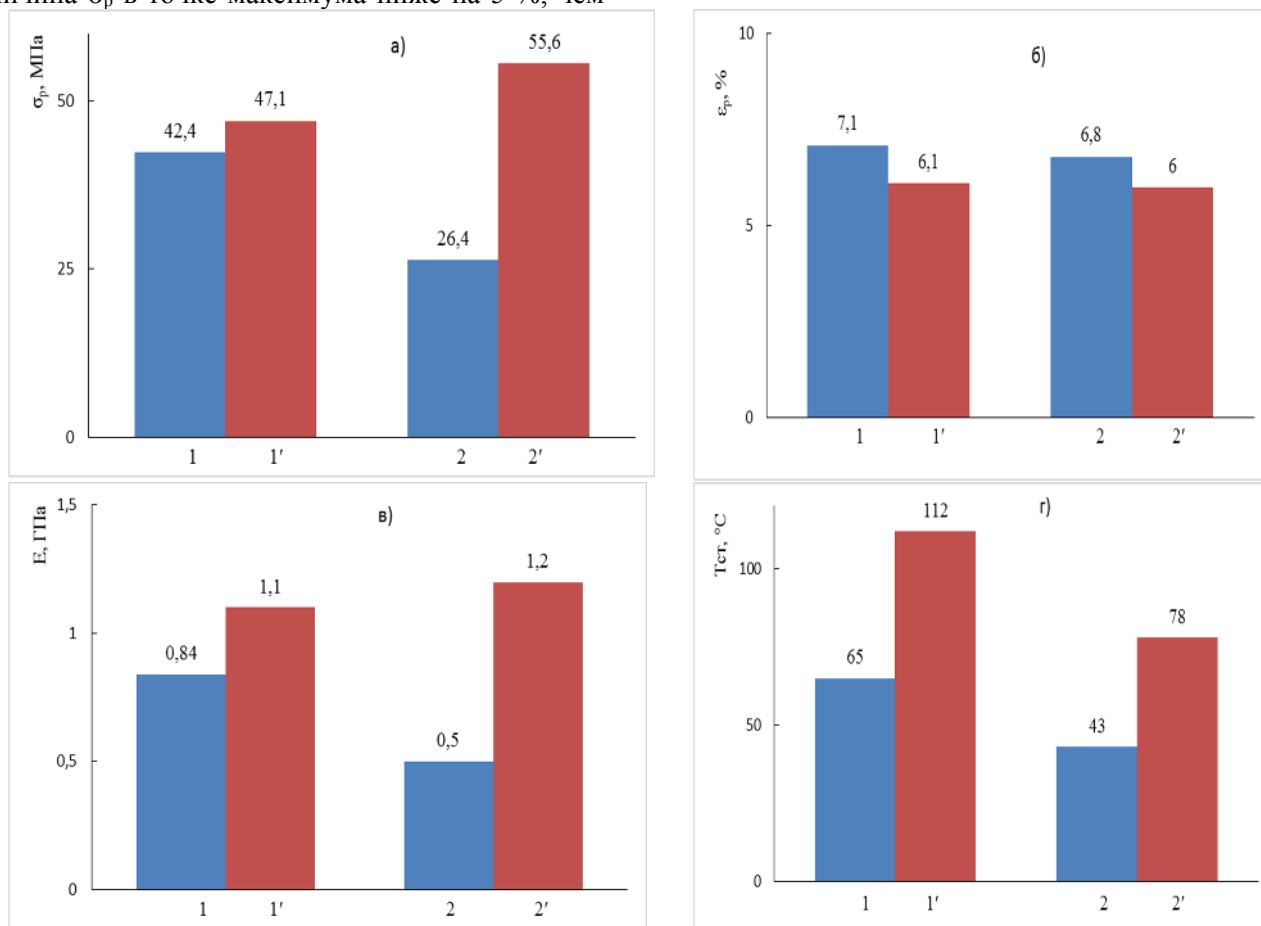


Рис. 1. Зависимость σ_p (а), ε_p (б), E (в) и $T_{ст}$ (г) от типа отвердителя и режима отверждения для образцов составов: 1, 1' – ЭД-16 + УП-583; 2, 2' – ЭД-16 + (УП-583 + ООГ). Образцы отверждены по режимам 20 °C/240ч (1, 2) и 2 0 °C/240ч + 120 °C/3ч (1', 2').

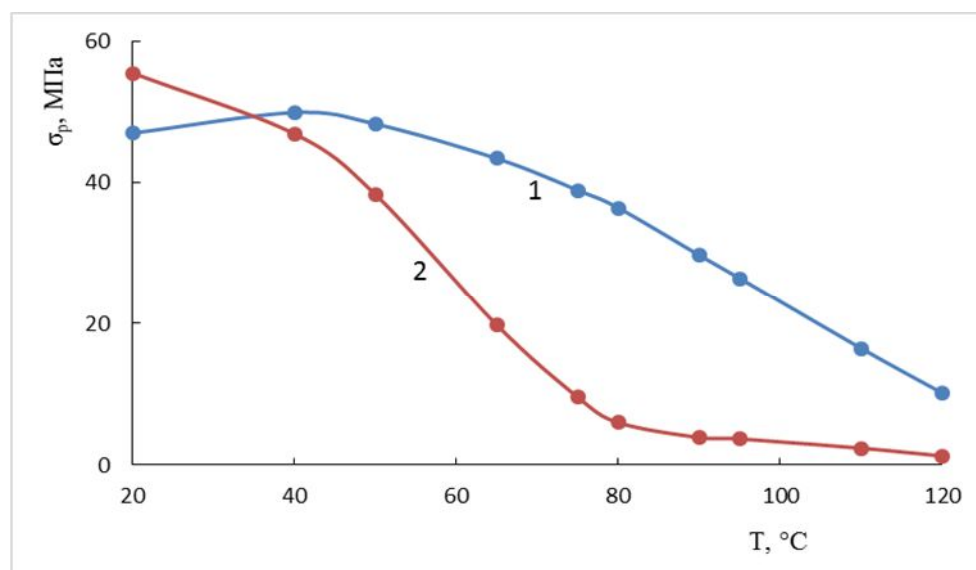


Рис. 2. Температурные зависимости σ_p для эпоксидных полимеров, отвержденных УП-583 (1) и комплексным отвердителем (2) по режиму 20°C/240ч + 120°C/3ч.

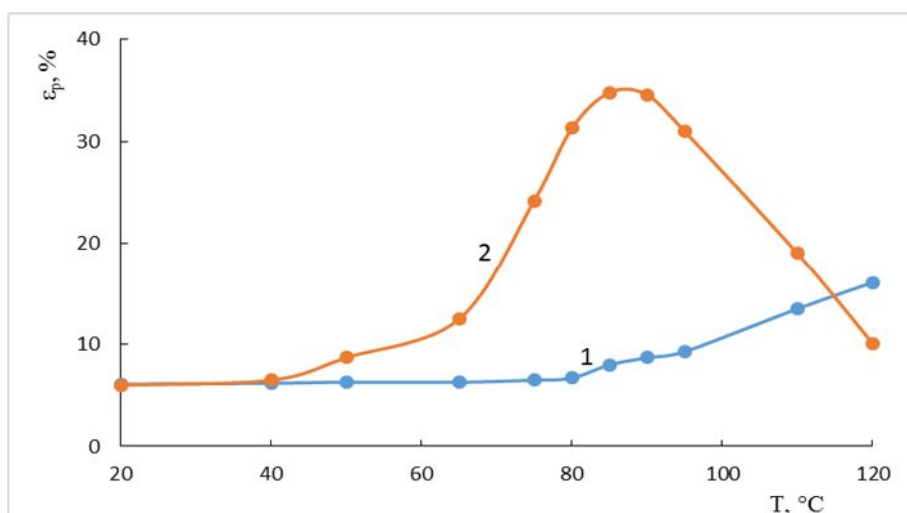


Рис. 3. Температурные зависимости ε_p для эпоксидных полимеров, отвержденных УП-583 (1) и комплексным отвердителем (2) по режиму $20^\circ\text{C}/240\text{ч} + 120^\circ\text{C}/3\text{ч}$.

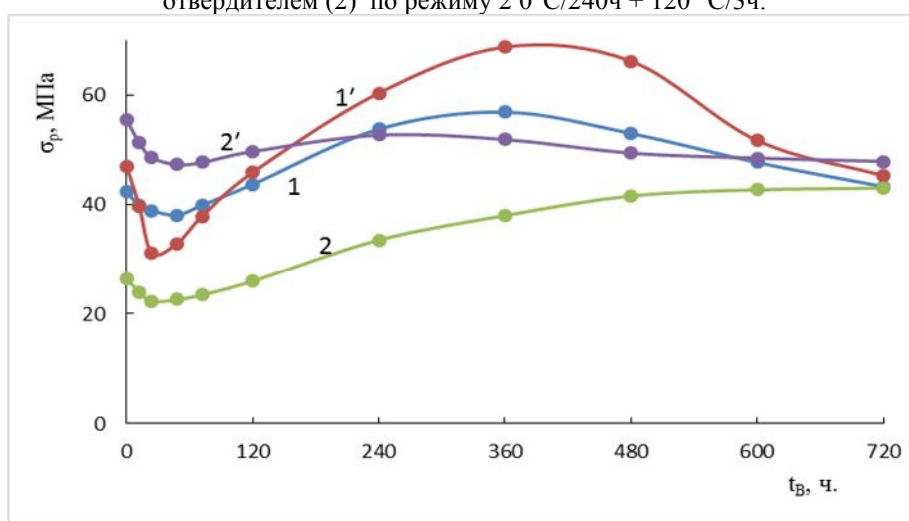


Рис. 4. Зависимость σ_p от времени выдержки t_B в воде образцов составов: 1, 1' – ЭД-16 + УП-583; 2, 2' – ЭД-16 + (УП-583 + ООГ). Образцы отверждены по режимам $20^\circ\text{C}/240\text{ч}$ (1, 2) и $20^\circ\text{C}/240\text{ч} + 120^\circ\text{C}/3\text{ч}$ (1', 2')

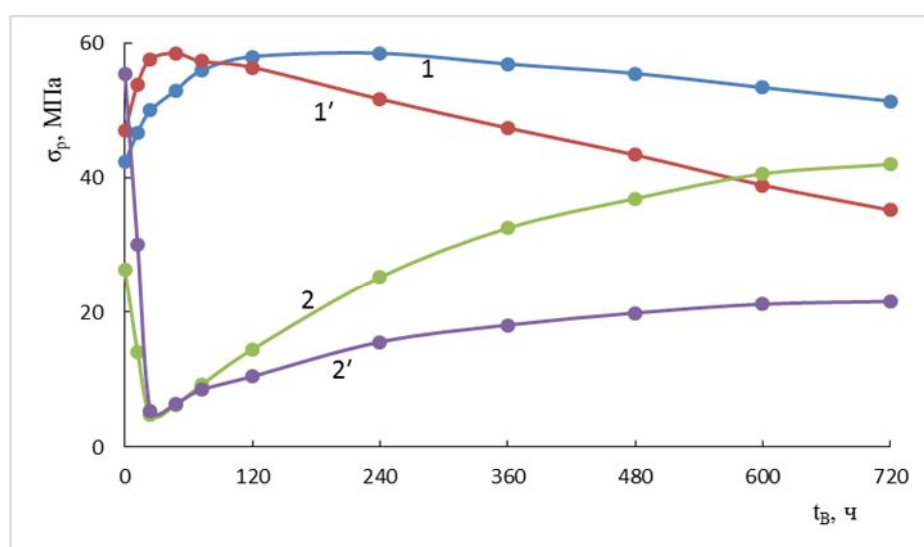


Рис. 5. Зависимость σ_p от времени выдержки t_B в спирте образцов составов: 1, 1' – ЭД-16 + УП-583; 2, 2' – ЭД-16 + (УП-583 + ООГ). Образцы отверждены по режимам $20^\circ\text{C}/240\text{ч}$ (1, 2) и $20^\circ\text{C}/240\text{ч} + 120^\circ\text{C}/3\text{ч}$ (1', 2')

При выдержке образцов в спирте наблюдается несколько отличная картина (рис. 5). Для образцов, отвержденных УП-583 как без подогрева, так и с термообработкой, отсутствует снижение σ_p при малых t_B . Уже при $t_B=12$ ч наблюдается заметный рост прочности. Увеличение σ_p происходит до $t_B=240$ ч для образцов, отвержденных при комнатной температуре, с образованием максимума, после чего прочность убывает, но тем не менее даже при $t_B=720$ ч прочность образца, выдержанного в спирте, выше, чем прочность исходного образца (51,5 против 42,4 МПа). Для термообработанного образца максимум прочности достигается уже через 48 ч экспозиции в спирте, а при $t_B=720$ ч параметр σ_p снижается до значений, меньших, чем начальная прочность (35,3 против 47,1 МПа соответственно). В то же время

для образцов, отвержденных комплексом, при малых временах выдержки (24 ч) в спирте наблюдается резкое снижение прочности на 80-90 %, после чего происходит монотонный подъем значений σ_p .

При этом для образцов, отвержденных при комнатной температуре, их прочность при $t_B=720$ ч на 61 % выше начальной (42,1 против 26,4 МПа). Для термообработанных же образцов прочность при $t_B=720$ ч, наоборот, на 61 % ниже, чем у исходного образца (21,6 против 55,6 МПа). Одной из причин такого разного поведения образцов, выдержанных в спирте и воде, может быть существенное отличие в количествах сорбированной жидкой среды (5,24 % в спирте и 1,25 % в воде).

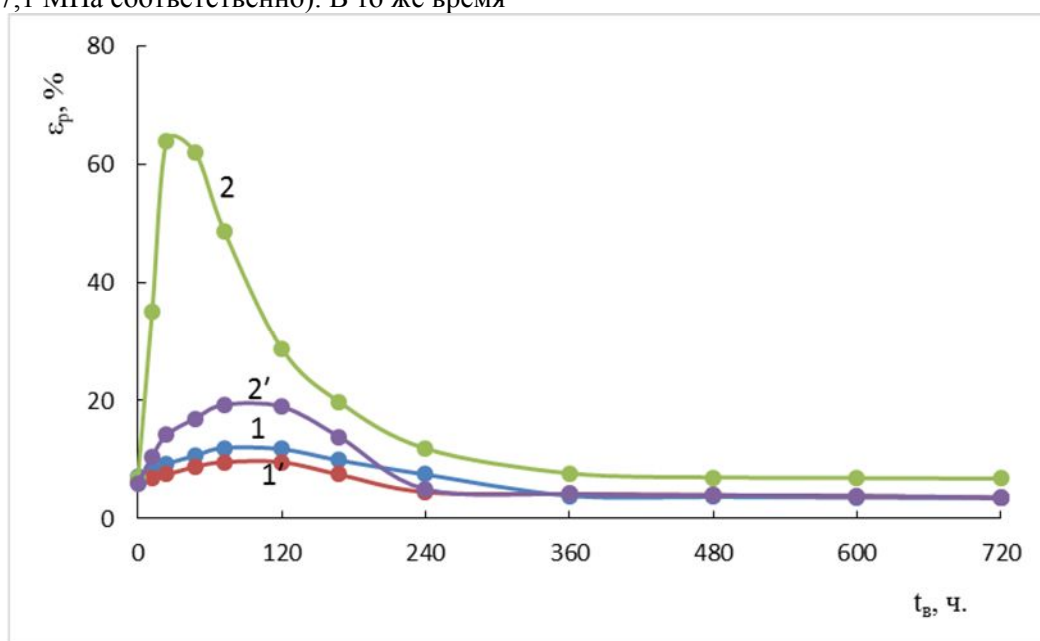


Рис. 6. Зависимость ϵ_p от времени выдержки t_B в спирте образцов составов: 1, 1' – ЭД-16 + УП-583; 2, 2' – ЭД-16 + (УП-583 + ООГ). Образцы отверждены по режимам 20°C/240 ч (1, 2) и 20°C/240 ч + 120°C/3 ч (1', 2')

Зависимости деформации при разрыве от времени выдержки в спирте представляют (рис. 6) экстремальные кривые с максимумом при $t_B=72$ ч для композитов, отвержденных УП-583, как с подогревом, так и без подогрева. После достижения максимума ϵ_p монотонно убывает с увеличением t_B до значений почти в два раза меньших, чем у исходных образцов. Максимумы на зависимостях $\epsilon_p - t_B$ для композитов, содержащих комплексный отвердитель, выражены более рельефно. При этом величина деформации для образца, отвержденного без подогрева, в 9 раз больше, чем у исходного. Для композита, доотвержденного при 120 °С, увеличение деформации также значительно и составляет 3,2 раза.

Как следует из рис. 7, выдержка эпоксидных полимеров в воде приводит также к изменению их температуры стеклования. Видно, что для образцов, отвержденных без подогрева, при малых временах выдержки в воде параметр $T_{ст}$, немного снижается только при весьма малых временах выдержки $t_B=3-5$ ч. Далее с ростом t_B величина $T_{ст}$ начинает возрастать, причем особенно интенсивно эффект проявляется в интервале t_B от 10 до 72 ч, где среднее приращение $T_{ст}$ составляет примерно 0,25°C за 1 час водостарения. В интервале t_B от 72 до 240 ч скорость роста существенно ниже (0,012 °C /ч), а при t_B от 240 до 720 ч стремится к 0 (0,0021°C/ч). Рост $T_{ст}$, очевидно, свидетельствует об увеличении частоты пространственной сетки в полимере.

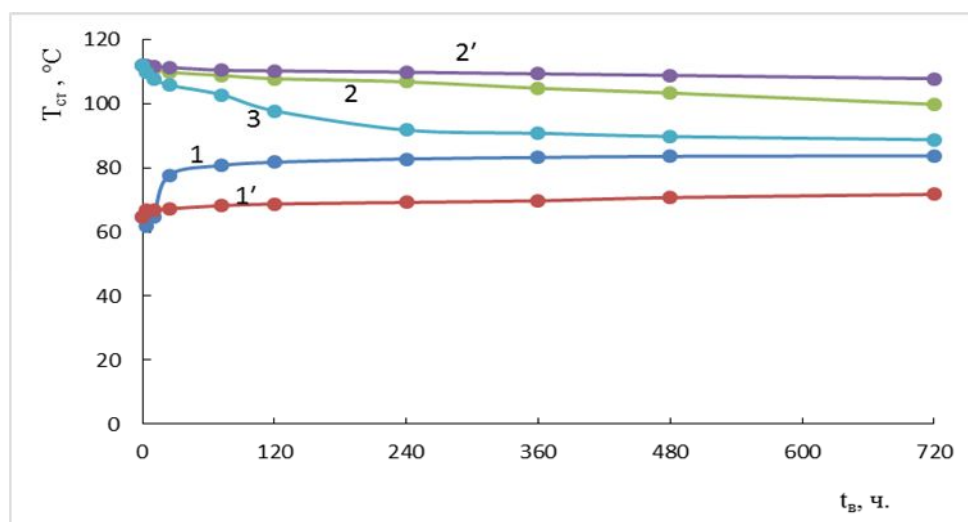


Рис. 7. Зависимость $T_{ст}$ от времени выдержки t_b для образцов на основе смолы, отвержденной УП-583. Образцы отверждены по режимам $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч}$ (1, 2) и $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч} + 120\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ ч}$ (1', 2', 3). 1, 2 – выдержка в воде; 1', 2' – на воздухе; 3 – расчетные значения

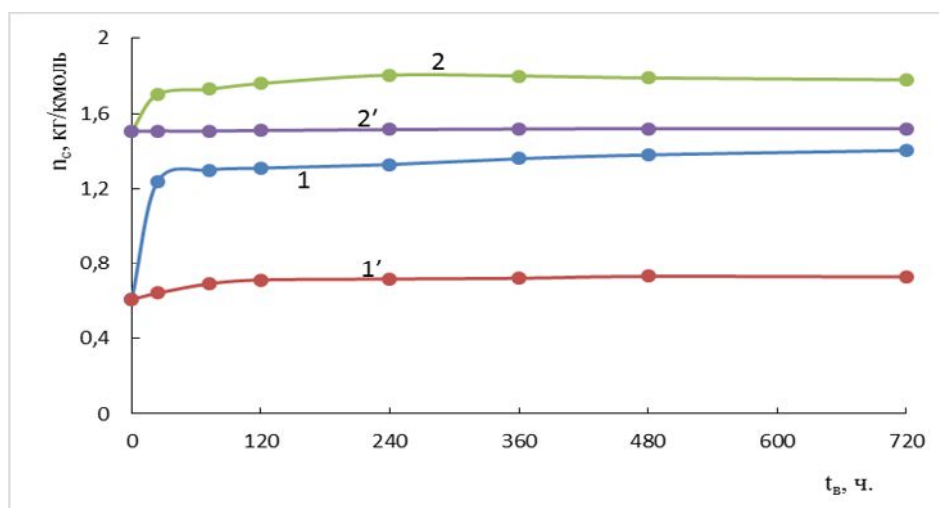


Рис. 8. Зависимость ρ_c от времени выдержки t_b для образцов на основе смолы, отвержденной УП-583. Образцы отверждены по режимам $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч}$ (1, 2) и $20\text{ }^{\circ}\text{C}/240\text{ ч} + 120\text{ }^{\circ}\text{C}/3\text{ ч}$ (1', 2'). 1, 2 – выдержка в воде; 1', 2' – на воздухе.

Действительно, результаты расчета плотности химической сетки ρ_c подтверждают это предположение. Как следует из рис. 8, для образца, отвержденного без подвода тепла извне, в первые часы его экспозиции в воде наблюдается резкий рост ρ_c , после чего скорость его увеличения быстро убывает. Полученные результаты, на наш взгляд, могут быть объяснены следующим образом. Сорбированная полимером вода, по-видимому, ослабляет физические связи, что приводит к повышению интенсивности молекулярного движения. Вследствие этого возрастает вероятность контакта непрореагировавших реакционноспособных групп и, следовательно, образования дополнительных химических сшивок. В случае старения образцов на воздухе наблюдаемые изменения параметров $T_{ст}$ (рис. 7, кривая 1') и ρ_c (рис. 8, кривая 1') крайне незначительны. При

этом и они в большей мере могут быть отнесены к эффекту, связанному с действием влаги, сорбированной из воздуха.

Наблюдаемые результаты дают основание говорить о существенном ускорении процесса доотверждения эпоксидного полимера в воде на глубоких стадиях конверсии реакционноспособных групп. При этом за сравнительно малое время t_b (24 – 72 ч) достигаются значения параметра ρ_c , близкие к таковым для термообработанного образца (рис. 8, кривая 2). Для образцов, подвергнутых прогреву, наблюдается несколько отличная картина. Хотя и здесь наблюдается доотверждение образца при выдержке его в воде, что находит отражение в некотором увеличении ρ_c с ростом t_b (рис. 8, кривая 2), превалирует эффект пластификации, обуславливающий монотонное снижение $T_{ст}$ по мере возрастания t_b (рис.

7, кривая 2). Интересно, что для термообработанного полимера уменьшение его теплостойкости во времени наблюдается даже при его старении на воздухе (рис. 7, кривая 2'). По-видимому, это связано с пластифицирующим действием влаги, сорбированной из воздуха. Полученные результаты позволяют предположить, что для обеспечения более высокой работоспособности пленочных образцов на основе эпоксидных композиций следует стремиться к достижению некоторой оптимальной, отличной от предельной полноты отверждения.

Как известно, температуру стеклования пластифицированной системы $T_{ст1,2}$ можно рассчитать в соответствии с уравнением Фокса [28]:

$$1 / T_{ст1,2} = W1 / T_{ст1} + W2 / T_{ст2},$$

где $W1$ и $W2$ соответственно весовые доли полимера и пластификатора, $T_{ст1}$ и $T_{ст2}$ – их абсолютные температуры стеклования (К).

Рядом исследований [28, 29] было установлено, что переход, соответствующий расстеклованию воды, лежит в интервале температур от 135 до 139 К. Взяв среднее значение $T_{ст2} = 137$ К, можно рассчитать $T_{ст1,2}$ для эпоксидного полимера, выдержанного в воде. Результаты расчета представлены на рис. 7 в виде кривой 3. Из данного рисунка видно достаточно хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями. Наблюдаемое некоторое превышение экспериментальных значений над расчетными можно объяснить тем, что не вся сорбированная полимерными образцами вода диспергирована на молекулярном уровне. По-видимому, часть ее образует кластеры конечной протяженности, заполняющие микропустоты в образцах. Результаты электронномикроскопических исследований с поверхности скола образцов, содержащих сорбированную в процессе водостарения влагу, подтверждают это предположение.

В свете высказанного предположения о наложении эффектов пластифицирования и доотверждения эпоксидных полимеров при их экспозиции в жидкой среде становится понятным наблюдаемое изменение их деформационно-прочностных свойств под воздействием воды и спирта. При малых t_b действие сорбируемой влаги (или другой физически активной жидкости) направлено главным образом на ослабление межмолекулярного взаимодействия в образце, вследствие чего снижается его прочность и растет деформативность. При больших значениях t_b , когда количество поглощенной воды становится достаточно большим и развивается довольно интенсивная молекулярная подвижность, превалируют процессы доотверждения, приводящие к увеличению плотности поперечного сшивания и,

как следствие, к снижению деформационной способности и росту показателя прочности.

Установлено, также, что материалы на основе синтезированного комплекса обладают пониженной горючестью. Их кислородный индекс составляет 26% против 21% у полимеров, отвержденных УП-583. Оценка устойчивости композита к воздействию плесневых грибов, показала, что композиции на основе исследованного комплекса обладают достаточной фунгитоксичностью: степень роста плесени 0 (то есть рост плесени под микроскопом не наблюдается) против 2 (слабое развитие плесени) для образцов на основе исходного отвердителя УП-583. Все это расширяет возможные области применения таких композиций, в первую очередь, в качестве противообрастающих покрытий.

Выводы. Таким образом, разработан способ синтеза комплекса на основе оловоорганического галогенида и аминафенольного отвердителя УП-583. Показано, что эпоксидные композиты, содержащие такие комплексы, отличаются хорошим уровнем физико-механических свойств, водостойкостью, повышенной стойкостью к развитию грибов и плесени, а также лучшей огнестойкостью. Исследованные полимеры являются перспективными для получения на их основе противообрастающих покрытий для гидротехнического оборудования, эксплуатирующегося в условиях повышенных температур, при наличии в окружающей среде водорослей, грибов и самых разнообразных микроорганизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Звягинцев А.Ю., Полтаруха О.П., Масленников С.И. Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор) // Вода: химия и экология. 2015. №1. С. 37–60.
2. Парталы Е.М. Обрастание в Азовском море. Мариуполь: Рената, 2003. 378 с.
3. Rubio D, Lopez-Galindo C., Casanueva J.E., Nebot E.. Monitoring and assessment of an industrial antifouling treatment. Seasonal effects and influence of water velocity in an open once-through seawater cooling system // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 67. Iss. 1-2. Pp. 378–387.
4. Лубянов И.П. Экспериментальное исследование применения метода защитных электрофильтров для предупреждения проникновения зоокомпонентов обрастания в систему технического водоснабжения // Сб. науч. статей НИИ гидробиологии Днепропетровского университета. 1975. №16. С. 3–26.

5. Патент RU 2713354. МПК C09D163/00, C09D5/16, C08L63/00. Способ получения противообрастающей эмали. Дринберг А.С. АО «Русские краски» (RU); заявл. 26.06.2019; опубл. 04.02. 2020.
6. Патент RU 2703636 МПК C09D163/00, C09D5/16, C08L63/00. Эмаль для атмосферостойкого радиационностойкого дезактивируемого противообрастающего грибостойкого покрытия. Лысов А.А., Мещеряков Ю.Я., Ковальчук Ю.Л., Карпов В.А. ООО «Всесоюзный научно-исследовательский институт электроизоляционных материалов ВНИИЭИМ» (RU), АО «научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии- Атомстрой» (RU); завл. 24.12.2018; Опубл. 21. 10. 2019.
7. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие; Пер. с англ. Под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия. 736 с.
8. Мэтьюз Ф., Роллинг Р. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 407 с.
9. Журавлева Н.И., Акопьян В.А. Высокомолекулярные соединения: учебное пособие. Часть VI. Синтетические полимеры. Самара: Изд-во «Самарский университет», 2014. 528 с.
10. Каблов В.Ф., Новопольцева О.М., Кейбал Н.А., Кочетков В.Г., Лапина А.Г., Крюкова Д.А. Элементоорганические олигомерные модификаторы эластомерных композиций // Вестник технологического университета. 2015. Т.18. №14. С. 59–61.
11. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн.2/ Под ред. Дж.Любина; Пер. с англ. А.Б. Геллера и др. Под ред. Б.Э. Геллера. М: Машиностроение, 1988. 584 с.
12. Сорокин М. Ф., Кочнова З.А., Шодэ Л.Г. Химия и технология пленкообразующих веществ. М.: Химия, 1989. 480 с.
13. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980. 269 с.
14. Халтуринский Н.А. О механизме действия галогенсодержащих ингибиторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 11. С. 22–30.
15. Ушков В.А., Абрамов В.В., Лалаян В.М., Кирьянова Л.В. Слабогорючие эпоксидные полимеррастворы, используемые для восстановления и ремонтностроительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Том 21. №10. С. 36–40.
16. Ушков В.А., Лалаян В.М., Невзоров Д.И., Ломакин С.М. О влиянии фталатных и фосфатных пластификаторов на воспламеняемость дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Том 22. №10. С. 25–31.
17. Халтуринский Н.А., Рудакова Т.А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // Химическая физика. 2008. Т. 27. №6. С. 73–84.
18. Ушков В.А., Абрамов В.В., Григорьева Л.С., Кирьянова Л.В. Термостойкость и пожарная опасность эпоксидных полимеррастворов // Строительные материалы. 2011. №12. С. 68–71.
19. Ушков В.А., Лалаян В.М., Ломакин С.М., Невзоров Д.И. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность, 2013. Т. 22. №6. С. 33–37.
20. Ушков В.А., Фиговский О.Л., Копытин А.В., Шувалова Е.А. Воспламеняемость и дымообразующая способность эпоксидных композиционных материалов // Инженерный вестник Дона. 2017. №1. ivdon.ru/magazine/archive/nly/2017/3991.
21. Беев А.А., Микитаев А.К., Ошроева Р.З. Эпоксидные полимеры и компаунды с повышенной огнестойкостью // Пластмассы 1986. №5. С. 53–55.
22. Беев А.А., Микитаев А.К., Беева Д.А. Модифицированные эпоксидные олигомеры, полимеры, композиционные материалы на их основе // Поликонденсационные реакции и полимеры. Избранные труды. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2008. С. 21–45.
23. Беев А.А., Микитаев А.К., Беева Д.А., Якокутова А.А. Перспективные направления в производстве эпоксидных полимеров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2013. Т.3. №5. С. 6–12.
24. Патент 3622524 США. МПК2С 08 D 30/10. Compositions of epoxy resins cured with organotin compounds. Markowitz M., Kohn L.S. General Electric Co.; заявл. 03.09.1968; опубл. 23.11.1971.
25. Попов Л.К., Пляничник Н.И., Ситкин А.И., Огнева В.А. Фосфор- и оловосодержащие отвердители эпоксидных смол // Пластмассы. 1985. №8. С. 41–42.
26. Жубанов Б.А., Бойко Г.И., Умерзакова М.Б. Исследование механизма катализа кислотами Льюиса реакции образования алициклических полиимидов на модельных соединениях // Высокомолекул соединения. 1988. Т. 30Б. №1. С. 10–14.
27. Малкин А.Я., Аскадский А.А., Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. М.: Химия, 1978. 336с.

28. Brewis D.M., Comin J., Shalash R.J.A., Togg J.L. Interaction of water with some epoxide adhesives // Polymer. 1980. V.21. No. 3. Pp. 357–360.

29. Иллингер Дж., Шнейдер Н. Взаимодействие воды с эпоксигруппами в трех типах эпоксидных смол и композитах на их основе // Вода в полимерах. Пер. с англ. / Под ред. С. Роуланда. М.: Мир, 1984. С. 528–540.

Информация об авторах

Кочергин Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры общетехнических дисциплин; E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31

Носова Алла Николаевна, аспирант. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Кравчук Татьяна Николаевна, кандидат химических наук. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Григоренко Татьяна Ильинична, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Золотарева Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры товароведения и экспертизы непродовольственных товаров. E-mail: viktoria802@gmail.com. Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского. Украина, 83117, Донецк, ул. Щорса, 31.

Поступила 24.10.2020 г.

© Кочергин Ю.С., Носова А.Н., Кравчук Т.Н., Григоренко Т.И., Золотарева В.В., 2020

Kochergin Y.S., Nosova A.N., Kravchuk T.N., Grigorenko T.I., *Zolotareva V.V.
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky
*E-mail: viktoria802@gmail.com

PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES CURED BY A COMPLEX OF ORGANIC TIN HALIDE WITH AN AMINOPHENOL HARDENER

Abstract. A method for the synthesis of a complex based on an organic tin halide – dibutylol dibromide – and a aminophenol hardener of the UP-583 brand has been developed. It is found that samples cured with a complex hardener at room temperature are characterized by lower values of tensile strength, elastic modulus and glass transition temperature compared to samples cured with the original hardener UP-583. The values of strain at break are approximately the same for both hardeners. After heat treatment, the strength and modulus values for samples containing the complex sharply increase, as a result of which they are superior to samples based on UP-583. The deformation capacity does not change much, the glass transition temperature increases after heating, but remains significantly lower than for samples cured with the original UP-583. The observed change in the deformation and strength properties of samples during their exposure in a liquid medium is explained by the superposition of the effects of plasticization and re-hardening of epoxy polymers. At low exposure times, the action of the sorbed moisture is mainly aimed at weakening the intermolecular interaction in the sample. In result, its strength decreases and deformability increases. At large values of exposure times, when the amount of sorbed water becomes sufficiently large and a fairly intense molecular mobility develops, pre-hardening processes prevail, leading to an increase in the cross-linking density and, to a decrease in the deformation ability and an increase in the strength index. It is shown that epoxy composites containing a complex hardener are characterized by good performance in the water environment, increased resistance to the development of fungi and mold, as well as better fire resistance. The studied polymers are promising for obtaining antifouling coatings based on them for hydraulic equipment, sea and river vessels.

Keywords: epoxy composite, aminophenol hardener, complex, organic tin halide, deformation and strength properties, glass transition temperature, water resistance, fire resistance, antifouling coatings.

REFERENCES

1. Zvyagintsev A.Yu., Poltarukha O.P., Maslennikov S.I. Fouling of marine systems of technical water supply and analysis of methods of protection against fouling in water pipelines (analytical review) [Obrastanie morskikh sistem tekhnicheskogo vodosnabzheniya i analiz metodov zashchity ot obrastaniya v vodovodah (analiticheskij obzor)]. Water: chemistry and ecology. 2015. No.1. Pp. 37–60. (rus)
2. Partaly E.M. Fouling in the sea of Azov [Obrastanie v Azovskom more]. Mariupol: Renata, 2003. 378 p. (rus)
3. Rubio D., Lopez-Galindo C., Casanueva J.E., Nebot E. Monitoring and assessment of an industrial antifouling treatment. Seasonal effects and influence of water velocity in an open once-through seawater cooling system. Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 67. Iss. 1-2. Pp. 378–387.
4. Lubyantsov I.P. Experimental study of the application of the method of protective electrofilters to prevent the penetration of fouling zoo components into the technical water supply system [Eksperimental'noe issledovanie primeneniya metoda zashchitnykh elektrofil'trov dlya preduprezhdeniya proniknoveniya zookomponentov obrastaniya v sistemu tekhnicheskogo vodosnabzheniya]. Collection of scientific articles of the research Institute of Hydrobiology of Dnepropetrovsk University. 1975. No.16. Pp. 3–26. (rus)
5. Drinberg A.S. Method for obtaining antifouling enamel [Sposob polucheniya protivobrastayushchej email]. Patent RF, no. 2713354, 2020. (rus)
6. Lysov A.A., Meshcheryakov Yu.Ya., Kovalchuk Yu.L., Karpov V.A. Enamel for weather-resistant radiation-resistant decontaminated antifouling fungus-resistant coating [Emal' dlya atmosferostojkogo radiacionnostojkogo dezaktiviruemogo protivobrastayushchego griboostojkogo pokrytiya]. Patent RF, no. 2703636, 2019. (rus)
7. Handbook of fillers and reinforcements for plastics. Trans. from English. Ed. by P.G. Babaevsky. M.: Chemistry. 736 p.
8. Mathews F., Rolling R. Composite materials. Mechanics and technology. Moscow: Technosphere, 2004. 407 p.
9. Zhuravleva N.I., Akopyan V.A. High-Molecular compounds: textbook. Part VI. Synthetic polymers [Vysokomolekulyarnye soedineniya: uchebnoe posobie. Chast' VI. Sinteticheskie polimery]. Samara: publishing house "Samara University", 2014. 528p. (rus)
10. Kablov V.F., Novopol'tseva O.M., Keibal N.A., Kochetkov V.G., Lapina A.G., Kryukova D.A. Organoelementoligomeric modifiers of elastomeric compositions [Elementoorganicheskie oligomernye modifikatory elastomernyh kompozicij]. Bulletin of the technological University. 2015. Vol.18. No.14. Pp. 59–61. (rus)
11. Handbook of composite materials: in 2 books of Book 2. Ed. by J. Lubin; Trans. from English by A. B. Geller and others. Ed. by B. E. Geller. M.: Engineering, 1988. 584 p. (rus)
12. Sorokin M.F., Kochnova Z.A., Shode L.G. Chemistry and technology of film-forming substances [Himiya i tekhnologiya plenkoobrazuyushchih veshchestv]. M.: Chemistry, 1989. 480p. (rus)
13. Kodolov V.I. Retardants of polymer materials [Zamedliteli goreniya polimernyh materialov]. M.: Chemistry, 1980. 269p. (rus)
14. Khalturinsky N.A. On the mechanism of action of halogen-containing inhibitors [O mekhanizme dejstviya galogensoderzhashchih ingibitorov]. All material. Encyclopedic reference book. 2009. No. 11. Pp. 22-30; No. 12. Pp. 30–37. (rus)
15. Ushkov V.A., Abramov V.V., Lalayan V.M., Kiryanova L.V. Low-combustible epoxy polymer solutions used for restoration and repair building construction [Slabogoryuchie epoksidnye polimerrastvory, ispol'zuemye dlya vosstanovleniya i remonta stroitel'nykh konstrukcij]. Fire and Explosion safety. 2012. Vol. 21. No. 10. Pp. 36–40. (rus)
16. Ushkov V.A., Lalayan V.M., Nevzorov D.I., Lomakin S.M. On the influence of phthalate and phosphate plasticizers on the Flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials [O vliyaniy ftalatnykh i fosfatnykh plastifikatorov na vosplamenyayemost' dymobrazuyushchuyu sposobnost' polimernyh kompozicionnykh materialov]. Fire and Explosion safety. 2013. Vol. 22. No. 10. Pp. 25–31. (rus)
17. Khalturinsky N.A., Rudakova T. A. Physical aspects of polymer combustion and the mechanism of action of inhibitors [Fizicheskie aspekty goreniya polimerov i mekhanizm dejstviya ingibitorov]. Chemical physics. 2008. Vol. 2. No. 6. Pp. 73–84. (rus)
18. Ushkov V.A., Abramov V.V., Grigorieva L.S., Kiryanova L.V. Heat resistance and fire hazard of epoxy polymer solutions [Termostojkost' i pozharnaya opasnost' epoksidnykh polimerrastvorov]. Construction materials. 2011. No. 12. Pp. 68–71. (rus)
19. Ushkov V.A., Lalayan V.M., Lomakin S.M., Nevzorov D.I. On the influence of non-decomposable fillers on the Flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials [O vliyaniy nerazlagayushchihsya napolnitelej na vosplamenyayemost' i dymobrazuyushchuyu sposobnost' polimernyh kompozicionnykh materialov]. Fire and Explosion Safety. 2013. Vol. 22. No. 6. Pp. 33–37. (rus)

20. Ushkov V.A., Figovsky O.L., Kopytin A.V., Shuvalova E.A. Flammability and smoke-forming ability of epoxy composite materials [Vosplamnyaemost' i dymobrazuyushchaya sposobnost' epoksidnykh kompozitsionnykh materialov]. Engineering Bulletin of the Don. 2017. No. 1. ivdon. ru/ru/magazine/archive/nly 2017/3991. (rus)
21. Beev A.A., Mikitaev A. K., Oshroeva R.Z. Epoxy polymers and compounds with increased fire resistance [Epoksidnye polimery i kompaundy s povyshennoy ognestojkost'yu]. Plast. Masses. 1986. No. 5. Pp. 53–55. (rus)
22. Beev A.A., Mikitaev A.K., Beeva D.A. Modified epoxy oligomers, polymers, composite materials based on them [Modificirovannye epoksidnye oligomery, polimery, kompozitsionnye materialy na ih osnove]. Polycondensation reactions and polymers. Selected works. Nalchik: Kabardino-Balkar state University. 2008. Pp. 21–45. (rus)
23. Beev A.A., Mikitaev A.K., Beeva D.A., Yakokutova A.A. Promising directions in the production of epoxy polymers [Perspektivnye napravleniya v proizvodstve epoksidnykh polimerov]. Izvestiya Kabardino-Balkar state University. 2013. Vol. 3. No. 5. Pp. 6–12. (rus)
24. Markowitz M., Kohn L.S. Compositions of epoxy resins cured with organotin compounds. Application. Pat. USA, no. 3622524, 1971.
25. Popov L.K., Plyanichnik N.I., Sitkin A.I., Ogneva V.A. Phosphorus – and tin-containing hardeners of epoxy resins [Fosfor- i olovosoderzhashchie otverditeli epoksidnykh smol]. Plast. Masses. 1985. No. 8. Pp. 41–42. (rus)
26. Zhubanov B.A., Boyko G.I., Umerzakova M.B. Investigation of the mechanism of catalysis by Lewis acids of the reaction of formation of alicyclic polyimides on model compounds [Issledovanie mekhanizma kataliza kislotami L'yuisa reakcii obrazovaniya aliciklicheskih poliimidov na model'nykh soedineniyah]. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. B. 1988. Vol. 30. No. 1. Pp. 10–14. (rus)
27. Malkin A.Ya., Askadsky A.A., Kovriga V.V. Methods for measuring mechanical properties of polymers [Metody izmereniya mekhanicheskikh svoystv polimerov]. M.: Chemistry, 1978. 336 p. (rus)
28. Brewis D.M., Comin J., Shalash R.J.A., Togg J.L. Interaction of water with some epoxy adhesives. Polymer. 1980. V. 21. No. 3. Pp. 357–360.
29. Illinger J., Schneider N. Interaction of water with epoxy groups in three types of epoxy resins and composites based on them [Vzaimodejstvie vody s epoksigruppami v trekh tipakh epoksidnykh smol i kompozitakh na ih osnove]. Water in polymers. Trans. from English. Ed. S. Rowland. M.: Mir, 1984. Pp. 528–540. (rus)

Information about the authors

Kochergin, Yuri S. PhD, Professor. E-mail: ivano.tanya2011@yandex.ua. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Nosova, Alla N. Postgraduate student, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Kravchuk, Tatyana N. PhD. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Grigorenko, Tatyana I. PhD, Senior Researcher. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Zolotareva, Vmtoriya V. PhD, Assistant professor. Department of Commodity Science and Expertise of Non-Food Products. E-mail: viktorija802@gmail.com. Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky. Ukraine, 83117, Donetsk, st. Shchorsa 31.

Received 24.10.2020

Для цитирования:

Кочергин Ю.С., Носова А.Н., Кравчук Т.Н., Григоренко Т.И., Золотарева В.В. Свойства эпоксидных композитов, отвержденных комплексом оловоорганического галогенида с аминофенольным отвердителем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 89–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-89-101

For citation:

Kochergin Y.S., Nosova A.N., Kravchuk T.N., Grigorenko T.I., Zolotareva V.V. Properties of epoxy composites cured by a complex of organic tin halide with an aminophenol hardener. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 89–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-89-101

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112

¹Евтушенко Е.И., ¹Череватова А.В., ¹Кожухова Н.И., ¹Осадчая М.С.,
¹Старостина И.В., ²Кожухова М.И.

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

²Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин, США

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ ОТСЕВА ГРАНИТА В МЕЛЬНИЦАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО

Аннотация. В рамках статьи рассматривается возможность получения наноструктурированных вяжущих (НВ) на основе магматических интрузивных пород кислого состава на примере отсева гранита с применением помольных агрегатов различного типа с последующей оценкой степени эффективности их применения для данного вида алюмосиликатного сырья. Проводится сопоставительный анализ степени механоактивационного воздействия.

Проведен сравнительный анализ микроструктуры проб отсева гранита, измельченных в трех помольных агрегатах различного типа. Установлено, что тип мельницы оказывает существенное влияние не только на степень дисперсности и характер гранулометрического распределения частиц гранита, но и на их морфологические особенности. Выявлено, что наиболее эффективным помольным агрегатом при получении (синтезе) вяжущей системы из гранитного отсева является шаровая мельница, так как содержание частиц нано- и микроуровня в данной системе максимально, что в конечном итоге и определяет ее качество, как вяжущего материала.

Осуществлен анализ структурно-морфологических и прочностных характеристик НВ, полученного из отсева гранита в шаровой мельнице, которые находятся в соответствии с аналогичными данными на кварцевом НВ и позволяю говорить об эффективности применения шаровой мельницы как помольного агрегата для отсева гранита как сырьевого компонента при синтезе НВ.

Ключевые слова: гранит, механоактивация, мелющие агрегаты, гранулометрия, морфология частиц.

Введение. В современных реалиях индустрии строительства и производства строительных материалов все большую актуальность приобретают вопросы энергосбережения, разработки ресурсосберегающих технологий, а также снижения энергоемкости производственного процесса. Это утверждение носит под собой подтверждающую основу в виде принятых за последние годы правовых и нормативных документах, отраженных в общероссийских стратегиях и программах развития [1], которые требуют основательного решения выше упомянутых задач в строительной отрасли. Однако, одним из важных ограничивающих аспектов является тот факт, что самым популярным вяжущим материалом строительного назначения мирового масштаба на сегодняшний день является портландцемент. С учетом технологических особенностей производство цемента в корне противоречит задачам реализуемых государственных программ как с точки зрения энергоемкости процесса, а также с позиции неэкологичности.

В этой связи, весьма актуальным является поиск и реализация способов получения альтернативных вяжущих с использованием так называемых «зеленых» технологий, в то же время обеспечивающих более низкие показатели энергоемкости производственного процесса.

Отмеченным требованиям в полной мере соответствует относительно новый вид бесклнкерных вяжущих – наноструктурированное вяжущее (НВ), для которых в ряду преимуществ также следует отметить их довольно высокую эффективность по эксплуатационным показателям [2–4].

С точки зрения структурообразующих процессов, для НВ характерен поликонденсационно-полимеризационный тип твердения, радикальным образом отличающийся от гидратационного – в случае портландцемента.

В основу синтеза НВ положен холодный механохимический синтез, организованный по методу мокрого помола или механохимической активации силикатного или алюмосиликатного сырья до ультратонкодисперсного состояния (что является гарантией его экологической безопасности), при котором аморфный в естественных условиях силикат/алюмосиликат приобретает вяжущие свойства.

В области химических технологий и производства строительных материалов механохимическая активация является давно известным общепринятым эффективным способом улучшения качественных характеристик сырьевых компо-

нентов, используемых для синтеза вяжущих систем и материалов в широком спектре областей практического использования.

Популярность метода механохимической активации (механоактивации), как правило, связана с его доступностью и простотой реализации, а также высоким выходом (производительностью) получаемого продукта, чего нельзя сказать о применяемых физико-химических методах синтеза, модификации и обогащения сырья, таких как, например, золь-гель метод, возгонка, экстракция и т.д. [5–8].

Применение механоактивационного метода позволяет решать такие ключевые задачи материаловедения как:

- повышение реакционной активности сырья и, как следствие, улучшение требуемых эксплуатационных характеристик конечного материала;

- придание принципиально новых свойств сырью и получаемым материалам, что достигается в результате обеспечения размеров частиц значительно меньшего размерного масштаба, а также за счет формирования их более развитой поверхности, характеризующейся повышенной реакционной активностью;

- для поликомпонентных систем: возможность реализации механохимического синтеза (явление химического взаимодействия компонентов, составляющих систему) в процессе механоактивационного процесса. Как результат, проявление синергетического эффекта, в результате которого измельчаемая поликомпонентная система обнаруживает принципиально новые свойства и поведение, нехарактерные для составляющих его компонентов в отдельности.

В связи с высокой практической популярностью метода механической активации, в настоящее время используется довольно широкое разнообразие помольных и истирающих машин и дезинтеграторов, отличающихся принципами измельчения в зависимости от природы и особенностей диспергируемого материала, а также с учетом поставленной к реализации задачи.

Кроме того, мелющие агрегаты также разнообразны с точки зрения материала, из которого они изготовлены, материала футеровки, а также материала мелющего органа (цибельсы, цилиндры, бисер и т.д.) [9–11]. При этом ранее было исследовано и экспериментально доказано неоспоримое влияние вида используемого агрегата не только на гранулометрические характеристики измельчаемого объекта, но также на его химические и минеральные трансформации [12, 13].

Гранит как природное сырье достаточно широко используется в различных областях народного хозяйства, в частности, и в строительной отрасли. Однако с экономической точки зрения, а также с позиций энергосбережения, наиболее целесообразно рассматривать варианты использования некондиционного сырья или отходов промышленности. В данном случае могут быть рассмотрены отсе́вы дробления гранита при производстве гранитного щебня, которые, по оценке современных тенденций утилизации вторичного сырья создают довольно серьезные проблемы российским предприятиям-производителям из-за их крупнотоннажных объемов (выход отсе́ва может составлять до 40 % от объема производимого товарного щебня). Ограниченность его применения обоснована тем, что зерна отсе́ва в силу особенностей его образования, имеют анизотропную форму, также значительную долю тонкодисперсной фракции, содержание которой колеблется от 18 до 25 % [14].

Однако, несмотря на то, что отсе́вы гранита являются побочным продуктом, их стоимость нельзя назвать низкой. Именно поэтому, наиболее популярным с точки зрения утилизации, например, в дорожном строительстве [15, 16], является немытый, нефракционированный гранитный отсе́в со средним размером зерен 0–5 мм, что и определяет его дешевизну и, в тоже время, его низкое качество.

Логично предположить, что повышение качества отсе́ва гранита, например, в результате его фракционирования, является весьма ресурс- и энергозатратной задачей.

До недавнего времени, попытки использования отсе́вов гранита, как правило, ограничивались их введением в качестве инертных наполнителей лишь с целью замены более дорогостоящего реакционно активного компонента и, таким образом, для удешевления конечного продукта. При этом, его роль в процессах структурообразования, зачастую, минимальна или вовсе отсутствует [17, 18].

Ранее была установлена потенциальная возможность получения вяжущего НВ с использованием гранитного сырья [19]. Однако, достоверной информации об особенностях использования отходов в виде отсе́ва гранита не нашли должного отражения в научной литературе.

В рамках данного исследования рассматриваются особенности влияния различных типов помольных агрегатов на трансформации в компонентном составе интрузивных магматических пород на примере гранита, а также на изменения в гранулометрических характеристиках, на основании чего проведен сравнительный анализ эф-

фektivности механоактивационного воздействия различных механизмов механоактивации на исследуемый алюмосиликатный материал.

Так же ставилась цель выявления степени рациональности по показателю энергоёмкости вида исследуемого гранита с точки зрения механоактивационной диспергации при получении на его основе гранитного НВ.

Материалы и методы. В качестве исходного сырья в экспериментальной части исследований использовался гранитный отсев (рис. 1) Полтавского месторождения (Гереевский карьер, Украина) с фракцией 0–5 мм.

Методы. Для проведения сравнительного анализа эффективности механоактивационного воздействия с использованием различных типов помольных агрегатов в работе применялись следующие: планетарная мельница МП4/0,5; вибрационный истиратель ИВ-1; шаровая мельница с корундовой футеровкой РМШ-200.

Поиол осуществлялся методом одностадийного механохимического синтеза в водной среде.

Химический состав образцов гранитного отсева был определен методом рентгенофлуорисцентного анализа (XRF) на приборе ARL 9900 X-ray WorkStation (Termo Scientific), (рис. 2). Рентгеновские дифракционные спектры получены на дифрактометре ARL X'tra с использованием $\text{CuK } 1,2$ излучения.



Рис. 1. Гранитный отсев Полтавского месторождения (Гереевский карьер, Украина)

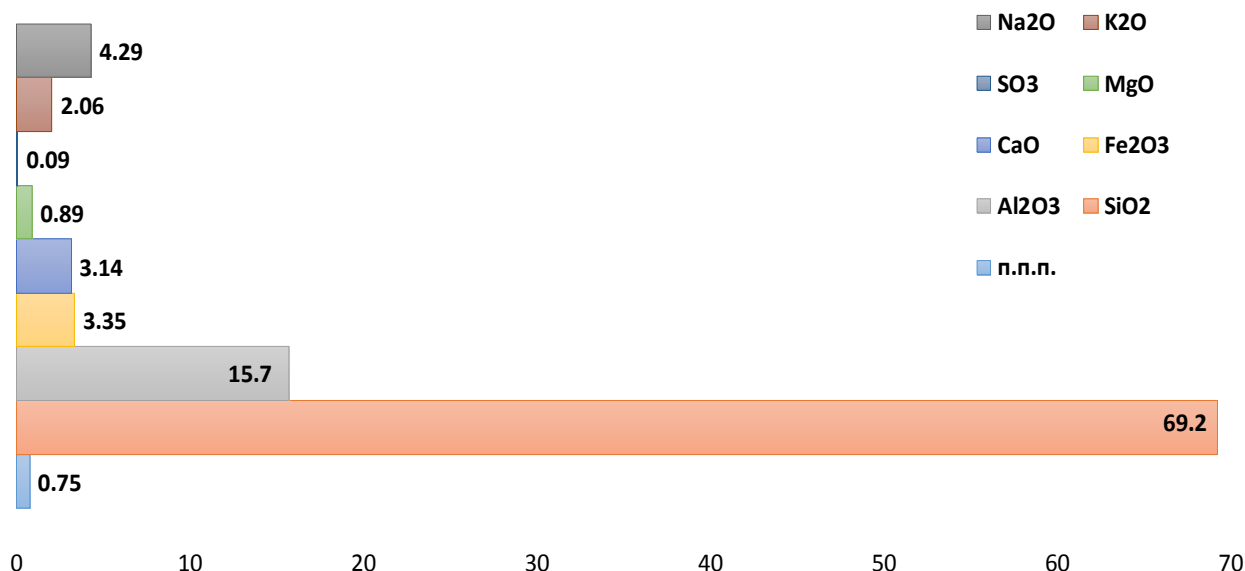


Рис. 2. Химический состав гранита Полтавского месторождения, %

Измерение удельной поверхности проводилось с помощью прибора SoftSorbi-II ver.1.0. В качестве газа-адсорбата использовался азот.

Изучение особенностей изменения гранулометрического состава алюмосиликатного сырья в процессе механоактивации проводилось с помощью лазерного анализатора размеров частиц Fritsch Analysette 22 Nano Tec plus.

Микроструктурные исследования экспериментальных образцов материала проводились на

сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU с возможностью микрорентгеноспектрального анализа.

Основная часть.

Визуальная оценка помола от мелющих тел
Визуальная оценка измельченного гранитного отсева с помощью применяемых в исследовании помольных агрегатов позволяет невооруженным глазом отметить значительную разницу в

окраске полученных порошков, которая изменяется от светло-бежевого (в шаровой мельнице) до серого (в планетарной мельнице), затем, до

грязно-серого (в вибрационном истирателе) (рис. 3).

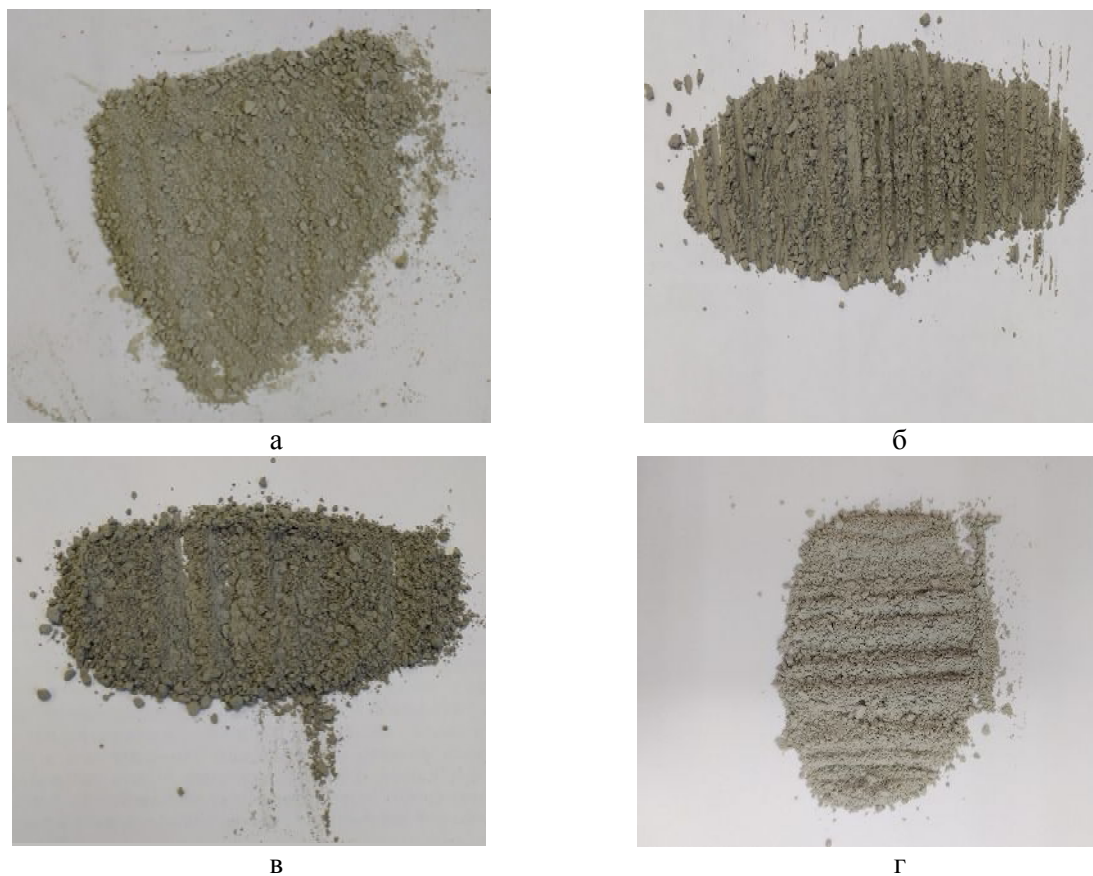


Рис. 3. Порошки отсева гранита, полученные в результате механоактивации в мелющих агрегатах разного типа:

а – шаровая мельница; б – планетарная мельница; в – вибрационный истиратель;
г – контроль (корундовая ступка)

Наблюдаемый эффект может свидетельствовать о попадании части вещества от футеровки и мелющих тел и о формировании, таким образом, намола в составе измельчаемого материала. С целью возможности определения типа мельницы, в которой происходит максимальный намол в процессе механоактивации, был проведен контрольный тест, в рамках которого используемый отсев гранита был измельчен в водной среде (моделирование способа мокрого помола, реализуемого в мельницах) с помощью лабораторной корундовой ступки и пестика, которые, в силу своей природной твердости (№9 по шкале Мооса) исключает образование намола в гранитной системе. Средняя твердость исследуемого гранитного сырья (в силу своей полиминеральности) колеблется в пределах значения 7–8.

Представленный на рис. 3, г порошок отсева гранита, измельченного в корундовой ступке, позволяет с уверенностью предположить, что намол от мельницы и мелющих тел имеет место при механоактивационном воздействии в мень-

шей степени – в планетарной мельнице; в большей степени – в вибрационном дезинтеграторе, в обоих случаях имеющих металлическую футеровку и мелющие органы. В случае с шаровой мельницей, визуально можно предположить об отсутствии намола.

В работах, посвященных влиянию металлического намола на свойства материалов, [21], было выявлено, что использование помольного оборудования с металлической футеровкой для диспергирования порошков приводит к образованию сверхтонкодисперсного Fe-содержащего компонента. В свою очередь было установлено, что при взаимодействии этого Fe-намола с водной средой (что является весьма актуальным для метода мокрого помола при синтезе НВ), тонкодисперсное железо трансформируется в гидроксид железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$, для которого характерно увеличение объема элементарной ячейки в 3-4,5 раза, по сравнению с исходным железистым намолем. Таким образом, происходящие фазовые превращения неизбежно влекут за собой возникновение внутренних давлений/напряжений,

инициирующих структурные деградации и вызывают разрушающий эффект формирующегося каркаса матрицы.

Фазово-минеральный анализ.

Минеральный состав гранита, согласно результатам количественного РФА, представлен следующей композицией (масс. %): кварц – 35,9; альбит – 51,9; анортит – 3,9; роговая обманка – 3,3 и биотит – 3,9.

Как видно, гранитный отсев имеет полиминеральный компонентный состав, минералы которого очень сильно отличаются как микроструктурными, так и структурно-механическими характеристиками. Следует предположить, что при помоле степень их механоактивации будет различной.

Гранулометрический анализ.

Основным ключевым критерием качественной оценки получаемого вяжущего является повышение содержания в исследуемой системе аморфизированной алюмосиликатной составляющей.

В процессе помола осуществлялся поэтапный мониторинг характера изменения структурных характеристик и химико-минералогического состава исследуемой системы.

Помол проводился до удельной поверхности материала $\approx 7000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Помол в планетарной мельнице дает возможность одновременно соединить несколько процессов: активацию (измельчаемый материал приобретает большую реакционную способность) и механохимическое легирование (в результате взаимодействия компонентов при помоле получается материал нового состава). Специфика схемы измельчения в планетарной мельнице позволяет создавать перегрузки в десятки раз, многократно увеличивая эффективность помола.

Результаты гранулометрического анализа гранитного отсева, после помола в мельницах различного типа приведены на рис. 4.

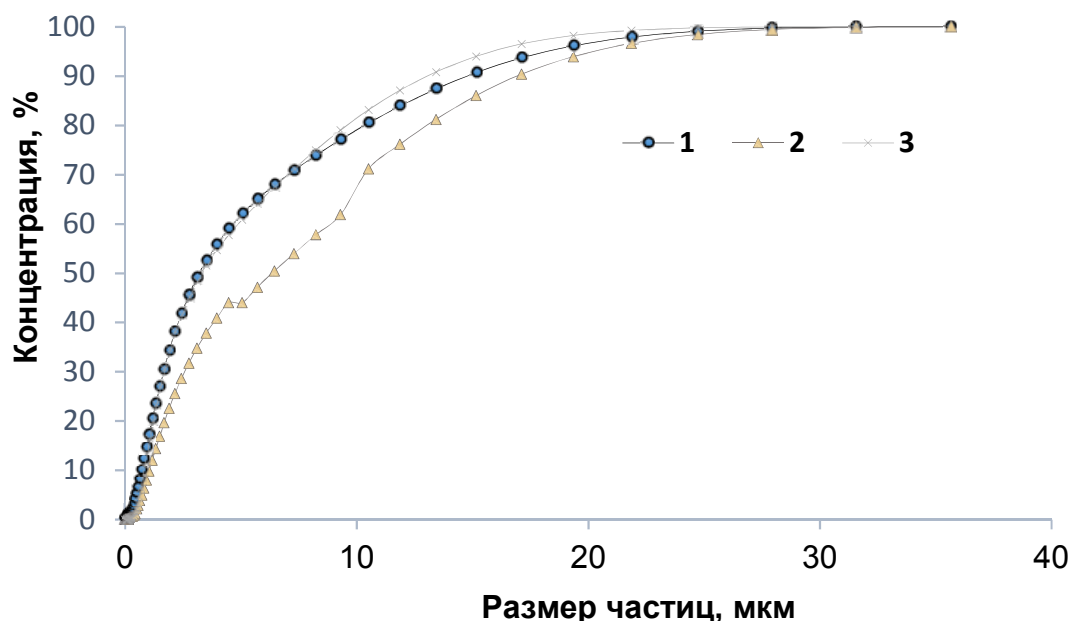


Рис. 4. Кривые гранулометрического распределения отсева гранита после измельчения в помольных агрегатах: 1 – шаровая мельница; 2 – планетарная мельница; 3 – вибрационный истиратель

Помол в вибрационном истирателе ИВ-1 даст возможность равномерного измельчения полиминерального сырья различной прочности и твердости до тонкодисперсного состояния. В данном помольном агрегате процесс измельчения интенсифицируется за счет одновременного сочетания вибрационного и истирающего воздействия на измельчаемый материал.

Помол в лабораторной шаровой мельнице РМШ-200 сочетает в себе два типа преобладающих нагрузок – это ударная и истирательная.

В процессе мокрого помола, благодаря постепенному понижению объемного содержания

жидкости и увеличению сил трения, возрастает температура процесса. С ростом температуры (с 20°C до 110°C) значительно повышается энергия процесса, уменьшается общая вязкость системы, повышается ее текучесть, что позволяет вести помол при повышенных концентрациях.

В результате получена активная минеральная вяжущая система с удельной поверхностью $7300 \text{ см}^2/\text{г}$, и содержанием частиц менее 5 мкм – 48 %.

Проводя общий сопоставительный анализ полученных диаграмм гранулометрического со-

става гранитного отсева, после помола в мельницах различного типа, пришли к выводу о том, что степень механоактивационного воздействия выше в шаровой и планетарной мельнице (содержание частиц диаметром 0,1–0,01 мкм: 12 и 4 % соответственно). Однако, содержание частиц диаметром от 1 до 10 мкм в вибро и шаровой мельнице на 30 и 50 % больше, чем в планетарной. Модальный диаметр для вяжущей системы, полученной в шаровой мельнице, составил 2,03 мкм, а для систем, полученных на планетарной и вибрационной мельнице: 12,12 и 9,98 мкм соответственно.

Микроструктурный анализ отсева гранита

Следует обратить особое внимание на изменение морфоструктурных особенностей материала в процессе измельчения. Так, для системы, измельчаемой в вибромельнице, характерно присутствие частиц остроугольной формы с существенными дефектами поверхности (рис. 5, а). Подобная картина наблюдается и у системы, измельчаемой в планетарной мельнице, но количество тонкодисперсной фракции существенно выше, хотя и не наблюдается реакционной активности частиц на поверхности (рис. 5, б). В то же время система, измельчаемая в шаровой мельнице, показывает активное взаимодействие и формирование наноструктур уже на стадии помола (рис. 5, в).

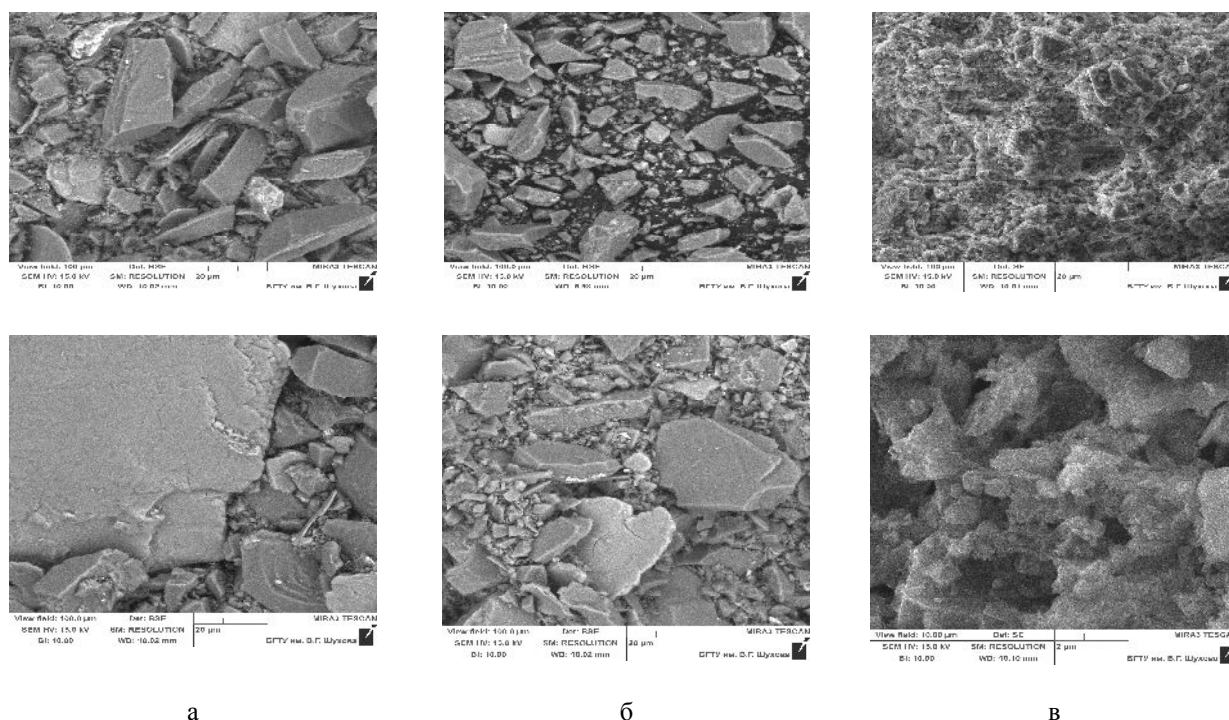


Рис. 5. Микроструктура отсева гранита, измельченного в разных мелющих агрегатах:
а) вибрационный истиратель; б) планетарная мельница; в) шаровая мельница

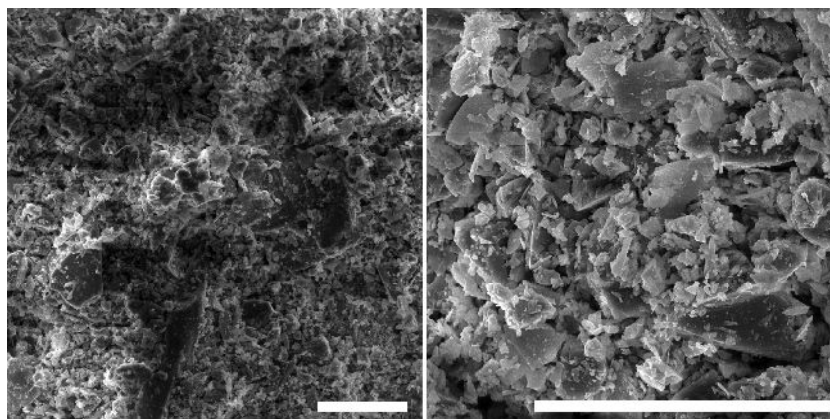
Особенности гранитного НВ

С целью оценки возможности получения вяжущего НВ на основе гранита в наиболее эффективном с точки зрения механической активации мелющем агрегате (шаровой мельнице), были заформованы экспериментальные образцы. Результаты прочностных испытаний показали, что гранитное НВ обеспечивает довольно высокие показатели прочности при сжатии (до 6 МПа), которые сопоставимы со значениями по прочности

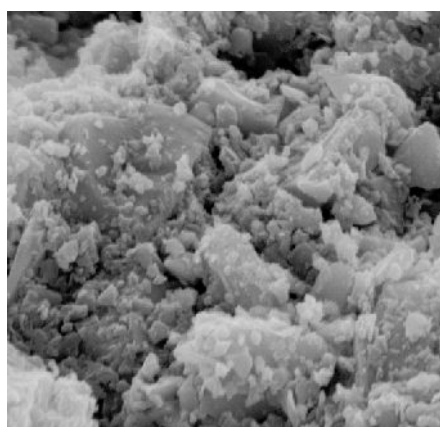
для ранее разработанных вяжущих НВ на основе кварцевого сырья (6,5–7 МПа) [22].

Анализ полученных прочностных характеристик гранитного НВ был произведен на основании дополнительного анализа его микроструктуры (рис. 6).

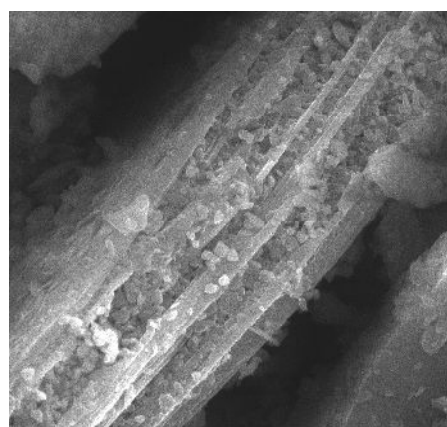
Морфологические особенности микроструктуры гранитного НВ (рис. 6) в сравнении их с микроструктурой и прочностными показателями кварцевого НВ в полной мере обосновывают полученные результаты по прочности на сжатие.



а – Гранитное НВ



б – Кварцевое НВ



в – Разрушающийся в процессе помола биотит

Рис. 6. Микроструктура образца затвердевшего гранитного вяжущего

Выводы. Таким образом, в результате анализа проведенных исследований, следует сделать вывод о том, что наиболее эффективным помольным агрегатом при получении (синтезе) вяжущей системы из гранитного отсева является шаровая мельница, так как содержание частиц нано и микроуровня в данной системе максимально, что в конечном итоге и определяет ее качество, как вяжущего материала.

Установлено, что тип мельницы оказывает существенное влияние не только на степень дисперсности и характер гранулометрического распределения частиц, но и на их морфологические особенности.

Выявлена высокая степень рациональности по показателю энергоемкости использования рассматриваемого вида гранита с точки зрения механоактивационной диспергации при получении на его основе наноструктурированного вяжущего, благодаря тому, что в данном гранитном отсеке содержится кварц в максимальном количестве, а также минимальная концентрация биотита.

Источник финансирования. Программа развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова, с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/906/2_final_naya-versiya-proekta-strategii_irso_28_06_206-s-dopolneniem.docx
2. Doroganov V.A., Pivinskii Yu.E., Cherevatova A.V. Thinning and plasticization of HCBS (highly concentrated ceramic binding suspension) based on high-alumina chamotte // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2004. Vol. 45. No. 3. Pp.172–176. DOI: 10.1023/B:REFR.0000036724.58090.bb.
3. Doroganov V.A., Pivinskii Yu. E. Structure-mechanical properties of plasticized mixes based on highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS) of high-alumina chamotte // *Refractories*

and Industrial Ceramics. Vol. 46. Issue 2. Pp 120–126. DOI: 10.1007/s11148-005-0066-6.

4. Череватова А.В., Жерновский И.В., Строкова В.В. Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технологии и перспективы применения. Saarbrücken. 2011. 170 с.

5. Нуштаева А.В., Мельникова К.С., Провирнина К.М. Применение золь-гель перехода в эмульсиях, стабилизированных твердыми частицами // Фундаментальные исследования. 2014. № 8–1. С. 55–58.

6. Нимчик А. Г., Усманов Х. Л., Кадирова З. Р. Изучения влияния отходов химической промышленности на возможность возгонки металлов в портландцементных сырьевых смесях // Universum: Химия и биология. 2020. Т. 2. № 68. С. 62–67.

7. Wright JD. NAJMS. Sol-gel materials: Chemistry and applications. 1st Edition. John D. Wright NAJMS, editor. London: CRC Press. 2001. 136 p. DOI: 10.1201/9781315273808

8. Montemor MF. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. Surface and Coatings Technology. 2014. № 258. С. 17–37. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.06.031

9. Абдулова С.Р. Физика измельчения слюды в вибрационных мельницах // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений 2016. Т.3. № 56. С. 125–133.

10. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В. Исследование влияния режимов измельчения на реакционную способность минеральных порошков // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2013. № 61–62. С. 248–254.

11. Monov V., Sokolov B., Stoenchev S. Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control // Cybernetics and Information Technologies 2012. Vol. 12. No. 2. Pp. 51–68. DOI: 10.2478/cait-2012-0012.

12. Mejdoub R., Hammi H., Khitouni M., Suñol J.J., M'nif A. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of Portland cement: Effect of particle size and crystallinity changes, Construction and Building Materials. 2017. Vol.152. No. 15. Pp. 1041–1050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.008.

13. Li J., Hitch M. Structural and chemical changes in mine waste mechanically-activated in various milling environments // Powder Technology.

2017. No. 308. Pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.003.

14. Артамонов В.А., Воробьев В.В., Свитов В.С. Опыт переработки отсеков дробления // Строительные материалы. 2003. № 6. С. 28–29.

15. Траутвайн А.И. Анализ влияния качественного состава асфальтобетонной смеси на основные показатели характеристик асфальтобетона в покрытии // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 2. № 1. С. 17–23. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-17-23.

16. Wang D., Chen X., X Xie, Stanjek H., Oeser M., Steinauer B. A study of the laboratory polishing behavior of granite as road surfacing aggregate Construction and Building Materials. 2015. № 89. Pp. 25–35. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.032.

17. Singh S., Nagar R., Agrawal V., A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand // Journal of Cleaner Production. 2016. No. 126. Pp.74–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.114.

18. Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю., Трунов П.В. Композиционные вяжущие и изделия с использованием техногенного сырья. 2013. Saarbrücken, 129 с.

19. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S., Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. Vol. 9. Pp. 16945–16955.

20. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 4. С. 38–43. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43

21. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Lebedev M.S., Sobolev K. Influence of Fe component from milling yield on characteristics of perlite based geopolymers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 012148. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012148.

22. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of application of zero-cement binders of a nanohydration hardening type // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 25. No. 1. Pp. 119–123. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032.

Информация об авторах

Евтушенко Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры Технология стекла и керамики. E-mail: eveviv@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Череватова Алла Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры Технологии стекла и керамики. E-mail: cherry_611@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Старостина Ирина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии. E-mail: starostinairinav@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Осадчая Майя Сергеевна, ведущий инженер. E-mail: mус87@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кожухова Марина Ивановна, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры гражданского строительства и охраны окружающей среды, Школа инжиниринга и прикладных наук, инженер кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. Университет Висконсин-Милуоки, штат Висконсин. P.O. Box 413, Милуоки, WI 53201, США

Поступила 28.10.2020 г.

© Кочергин Ю.С., Носова А.Н., Кравчук Т.Н., Григоренко Т.И., Золотарева В.В., 2020

¹Evtushenko E.I., ¹Cherevatova A.V., ^{1,*}Kozhukhova N.I., ¹Osadchaya M.S., ¹Starostina I.V.,
²Kozhukhova M.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
University of Wisconsin-Milwaukee, USA, WI 53211, Milwaukee, 3200 North Cramer Street
*E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru

STUDY OF MECHANOACTIVATION EFFECTIVENESS OF GRANITE SCREENING IN MILLS OF VARIOUS TYPES WHEN SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED BINDER

Abstract. In this paper, the possibility of obtaining nanostructured binders (NB) based on acidic igneous intrusive rocks is considered by the example of screening out granite using milling units of different types, followed by an assessment of the degree of effectiveness of their application for this type of aluminosilicate raw material. A comparative analysis of the degree of mechanoactivation impact of them is carried out.

A comparative analysis of the microstructure of samples of granite screening, crushed in three different milling units has been realized. It has been found that the type of milling unit significantly affects not only the degree of dispersion and the nature of the particle size distribution of particles, but also on morphological features of them. It was revealed that the most effective milling unit for obtaining (synthesizing) a binder system from granite screening is a ball mill, as the content of nano- and micro-level particles in this system are maximum, which ultimately determines its quality as a binder.

The analysis of the structural, morphological, and strength characteristics of NB obtained from the granite screening in a ball mill, which is following similar data on a quartz NB and allow us to speak about the effectiveness of the use of a ball mill is a grinding machine and granite screening as a raw component for the synthesis of NB.

Keywords: granite, mechanical activation, grinding aggregates, granulometry, particle morphology.

REFERENCES

1. Strategy for innovative development of the construction industry of the Russian Federation until 2030 [Strategia innovatsionnogo razvitiya stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda]: [Elektronnyy resurs] URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/906/2_finalnaya-versiya-proekta-strategii_irso_28_06_206-s-dopolneniem.docx

2. Dorogano V.A., Pivinskii Yu.E., Cherevatova A.V. Thinning and plasticization of HCBS (highly concentrated ceramic binding suspension) based on high-alumina chamotte. Refractories and Industrial Ceramics. 2004. Vol 45. Pp. 172–176. DOI: 10.1023/B:REFR.0000036724.58090.bb.

3. Doroganov V.A., Pivinskii Yu. E. Structure-mechanical properties of plasticized mixes based on highly concentrated ceramic binding suspensions (HCBS) of high-alumina chamotte. Refractories and

Industrial Ceramics. 2005. Vol.46. No.17. Pp. 120–126. DOI: 10.1007/s11148-005-0066-6.

4. Cherevatova A.V., Zhernovsky IV., Strokova V.V. Mineral nanostructured binders. Nature, technologies and application perspective [Mineral'nyie nanostrukturirovannyye vyazhushie]. Saarbrücken, 2011. 170 p. (rus)

5. Nushtaeva A.V., Melnikova K.S., Prosvirina K.M. Sol-gel transition in solid particle stabilized emulsions [Primeneniye zol'-gel' perekhoda v emul'siyakh, stabilizirovannykh tverdyimi chastitsami]. Fundamental'nyye issledovaniya. 2014. No. 8-1. Pp. 55–58. (rus)

6. Nimchik A.G., Usmanov H.L., Kadirova Z.R. Study of the effect of chemical industry waste on the possibility of sublimation of metals in Portland cement raw mixtures [Izucheniya vliyaniya otkhodov khimicheskoy promyshlennosti na vozmozhnost' vozgonki metalov v portlandsementnykh syr'yevykh smesyakh]. Universum: khimiya i biologiya. 2020. Vol. 2. Issue 68. Pp. 62–67. (rus)

7. Wright JD. NAJMS. Sol-gel materials: Chemistry and applications. 1st Edition. John D. Wright NAJMS, editor. London: CRC Press. 2001. 136 p. DOI: 10.1201/9781315273808.

8. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 258. Pp. 17–37. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.06.031.

9. Abdulova S.R. The physics of grinding mica in vibratory mills [Fizika izmel'cheniya slyudy v vibratsionnykh mel'nitsakh]. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits. 2016. Vol. 3. Issue 56. Pp. 125–133. (rus)

10. Trautvain A.I., Yadykina V.V. Study of grinding modes effect on reactivity feature of mineral powder [Issledovaniye vliyaniya rezhimov izmel'cheniya na reaktsionnuyu sposobnost' mineral'nykh po-roshkov]. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2013. No. 61–62. Pp. 248–254. (rus)

11. Monov V., Sokolov B., Stoenchev S. Grinding in Ball Mills. Modeling and Process Control. Cybernetics and Information Technologies. 2012. Vol. 12. No 2. Pp. 51–68. DOI: 10.2478/cait-2012-0012.

12. Mejdoub R., Hammi H., Khitouni M., Suñol J.J., M'nif A. The effect of prolonged mechanical activation duration on the reactivity of Portland cement. Effect of particle size and crystallinity changes. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. No 15. Pp. 1041–1050. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.008.

13. Li J., Hitch M. Structural and chemical changes in mine waste mechanically-activated in various milling environments. Powder Technology. 2017. No. 308. Pp. 13–19. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.12.003.

14. Artamonov V.A., Vorobiev V.V., Svitov V.S. Experience in processing crushing screenings [Opyt pererabotki otsevvov drobleniya]. Stroitel'nyye materialy. 2003. No. 6. Pp. 28–29. (rus)

15. Trautvain A.I. Analysis of the influence of the qualitative composition of the asphalt-concrete mixture on the main performance characteristics of asphalt concrete pavement. Construction Materials and Products. 2019. Vol. 2. No. 1. Pp. 17–23. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-1-17-23. (rus)

16. Wang D., Chen X., X Xie, Stanjek H., Oeser M., Steinauer B. A study of the laboratory polishing behavior of granite as road surfacing aggregate Construction and Building Materials. 2015. No 89. Pp. 25–35. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.032.

17. Singh S., Nagar R., Agrawal V. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. Journal of Cleaner Production. 2016. No. 126 Pp. 74–87. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.114.

18. Alfimova N.I., Vishnevskaya Ya.Yu., Trunov P.V. Composite binders and products using technogenic raw materials [Kompozitsionnyye vyazhushchiye i izdeliya s ispol'zovaniyem tekhnogennogo syr'ya]. Saarbrücken. 2013. No. 129. (rus)

19. Kozhuhova N.I., Zhernovskiy I.V., Osadchaya M.S., Strokova V.V., Tchizhov R.V. Revisiting a selection of natural and technogenic raw materials for geopolymer binders. International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. Pp. 16945–16955.

20. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V. Structure formation in alkali activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials with different crystallinity degree. Construction Materials and Products. 2018. Vol. 1. Issue 4. Pp. 38–43. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43.

21. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Lebedev M.S., Sobolev K. Influence of Fe component from milling yield on characteristics of perlite based geopolymers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 012148. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012148.

22. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Nelubova V.V. Prospects of application of zero-cement binders of a nanohydration hardening type. World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 25. No. 1. Pp. 119–123. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.01.7032.

Information about the authors

Evtushenko, Evgeny I. PhD, Professor. E-mail: eveviv@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Cherevatova, Alla V. PhD, Professor. E-mail: cherry_611@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Kozhukhova, Natalia I. PhD, Assistant professor. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Starostina, Irina V. PhD, Assistant professor. E-mail: starostinairinav@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukova, 46.

Osadchaya, Maya S. Engineer. E-mail: myc87@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostukov, 46.

Kozhukhova, Marina I. PhD, Post-Doctoral Associate. E-mail: kozhuhovamarina@yandex.ru. University of Wisconsin-Milwaukee. 3200 N Cramer Street, Milwaukee, WI 53211, USA

Received 28.10.2020

Для цитирования:

Евтушенко Е.И., Череватова А.В., Кожухова Н.И., Осадчая М.С., Старостина И.В., Кожухова М.И. Изучение эффективности механоактивации отсева гранита в мельницах различного типа при синтезе наноструктурированного вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112

For citation:

Evtushenko E.I., Cherevatova A.V., Kozhukhova N.I., Osadchaya M.S., Starostina I.V., Kozhukhova M.I. Study of mechanoactivation effectiveness of granite screening in mills of various types when synthesis of nanostructured binder. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 102–112. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-102-112

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-113-124

*Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: erygin.evgeny@gmail.com

РАЗРАБОТКА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье представлена методика разработки и результаты тестирования искусственных нейронных сетей для прогнозирования шероховатости при чистовом фрезеровании. В качестве базы исходных данных для создания и обучения нейронных сетей были использованы экспериментальные данные различных исследователей при обработке материалов с разными физико-механическими свойствами. В качестве основного идентификатора физико-механических свойств принято значение твердости материала. Кроме твердости материала входными параметрами сетей являются также режимы резания: подача инструмента, глубина и скорость резания. Использованы данные получаемой шероховатости для нескольких групп материалов: цветных металлов, конструкционных и нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов и инструментальной стали. Созданы девять узкоспециализированных нейронных сетей, прогнозирующих шероховатость при фрезеровании определенного материала, ряд комбинированных сетей путем объединения нескольких баз данных, включая широкоуниверсальную нейронную сеть для нескольких групп материалов. Выполнен сравнительный анализ результатов тестирования разработанных нейронных сетей по критерию относительной погрешности. Большинство представленных нейронных сетей имеют удовлетворительную погрешность, не превышающую 10 %. Отдельные нейронные сети имеют более высокую точность, показывая погрешность в пределах 5 %.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети (ИНС), объединенные ИНС, шероховатость, чистовое фрезерование.

Введение. Шероховатость поверхности является одним из важнейших показателей качества изделий, и в процессе разработки технологических процессов необходимо решать вопросы ее прогнозирования. В настоящее время большинство используемых расчетных моделей шероховатости поверхности при фрезеровании являются эмпирическими. Такие модели, как правило, имеют узкий диапазон применения с точки зрения обрабатываемых материалов и адекватны в заданном интервале изменения технологических режимов. Поэтому вопрос разработки универсальных моделей, применимых для различных материалов и технологических условий обработки является весьма актуальным. Использование нейронных сетей для решения этой задачи перспективно, так как позволяет получить высокую точность модели без проведения трудоемких экспериментов. Однако, это возможно только при наличии достаточно обширной базы исходных данных, связывающих режимы обработки различных материалов с получаемой шероховатостью обрабатываемой поверхности.

Методология. Для решения задачи авторами используется искусственная нейронная сеть (ИНС) с обратным распространением ошибки,

аналогичная сеть представлена в работе [1]. Основным результатом работы нейросетевой модели предусматривается возможность прогнозирования значений шероховатости поверхности для различных материалов и режимов обработки. Для идентификации свойств обрабатываемого материала принято использовать значение твердости HB, так как именно этот параметр по традиционным представлениям оказывает существенное влияние на формирование шероховатости поверхности. В качестве исходных данных для обучения нейронной сети использованы экспериментальные результаты, полученные разными исследователями [2–10]. Для повышения универсальности и гибкости моделей в базу включены данные об обработке материалов различных групп твердости: цветные материалы и сплавы (HB 80–90), конструкционные и нержавеющей стали (HB 170230), жаропрочные сплавы (HB 300) и инструментальная сталь (HB 373). Условия обработки варьируются также в достаточно широком диапазоне: скорость резания 28–313 м/мин, глубина резания 0,08–2,34 мм, подача 0,002–4,8 мм/об. Подробная информация об используемых экспериментальных данных представлена в табл. 1. Все приведенные материалы

обрабатывались фрезами с твердосплавными пластинами.

Основная часть. Для проверки функциональности и сравнительной характеристики точности нейросетевых моделей в зависимости от состава исходных данных ее обучения был разработан ряд нейронных сетей, включающих различные комбинации материалов и технологических режимов. В качестве входных параметров были приняты: скорость резания V м/мин, подача

S мм/об, глубина резания t мм, твердость обрабатываемого материала HB, на выходе получаем шероховатость R_a , мкм.

Первоначально были спроектированы отдельные нейронные сети, каждая из которых соответствует определенному материалу и режимам резания. На рис. 1 представлены гистограммы ошибок и графики регрессии этих нейронных сетей: № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6, № 7, № 8, № 9. В табл. 2 сведены результаты проверки точности работы сетей по итогам тестирования.

Таблица 1

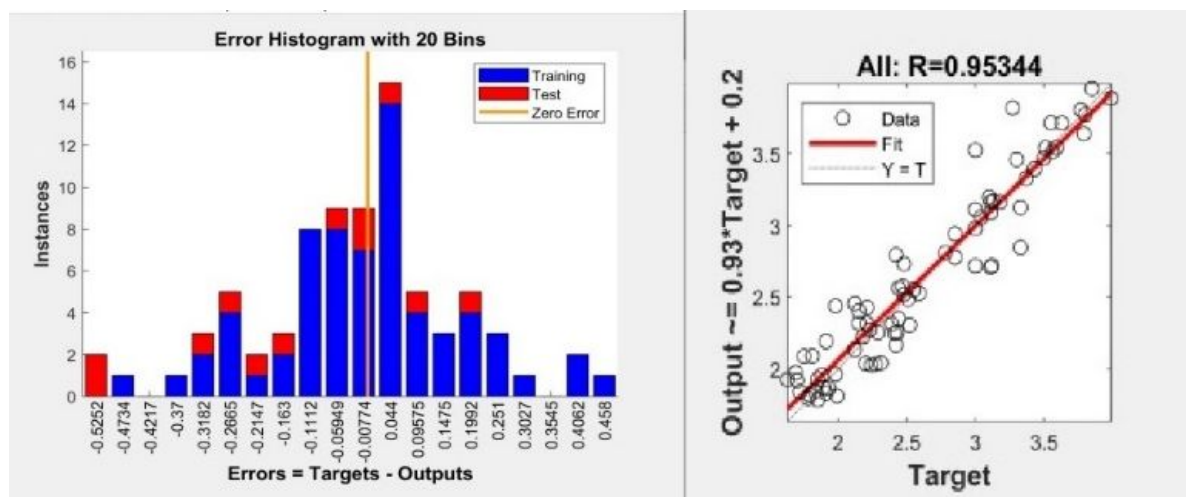
База данных для узкоспециализированных ИНС

№ ИНС	Обрабатываемый материал	Твердость	Диапазон скорости V м/мин	Диапазон подачи S мм/об	Диапазон глубины резания t мм	Объем данных	Авторы экспериментальных данных
1	Алюминиевый сплав	80	28 - 47	0,002 – 0,047	0,6–1	27	S. Palani, Y. Kesavanarayana [2]
2	Нержавеющая сталь IDМ 8365	210	150–313,2	0,096–0,234	0,5–2,34	24	Pavel Kovač, Borislav Savković, Marin Gostimirovic, Dušan Jesic, Ildiko Mankova [3]
3	Латунь	90	29,9–79,8	0,68–4,8	0,2–0,6	78	I. M. Soltan, M. E. H. Eltaib, R. M. El-Zahry [4]
4	Нержавеющая сталь 1Cr18Ni9Ti	210	70–150	0,2–0,6	0,08–0,16	30	Maohua Xiao, Xiaojie Shen, You Ma, Fei Yang, Nong Gao, Weihua Wei, and Dan Wu [5]
5	Низколегированная сталь	200	80–140	0,03–0,06	0,1–0,3	97	Jignesh G. Parmar, Prof. Alpesh Makwana [6]
6	Конструкционная сталь 9SMnPb28K	170	71–283	0,1 – 0,25	0,5–1	27	J. Paulo Davim [7]
7	Конструкционная сталь 50	230	138–243	0,1–0,238	0,54–0,8	18	Y. Sahin, A.R. Motorcu [8]
8	Жаропрочный сплав Inconel 718	300	47,5–185	0,083–0,167	0,1–0,5	20	Bapi Sarkar, Moola Mohan Reddy and Sujana Debnath [9].
9	Инструментальная штамповая сталь 4X5MΦ1C	373	100–140	0,4–0,72	0,2–0,5	27	Fu Tao, Liu Weijun, Zhao Jibin [10]

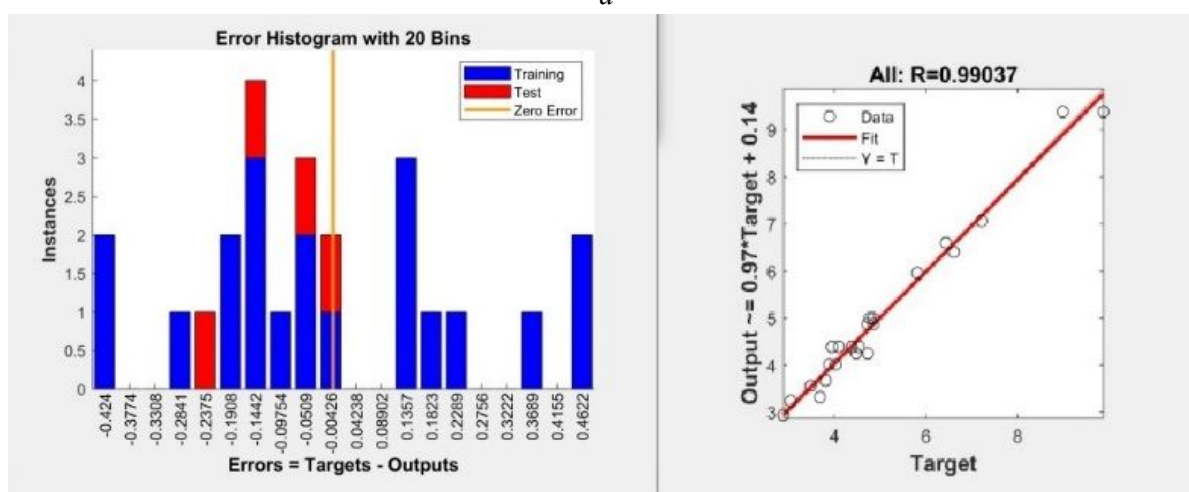
Таблица 2

Погрешность нейронных сетей № 1-9

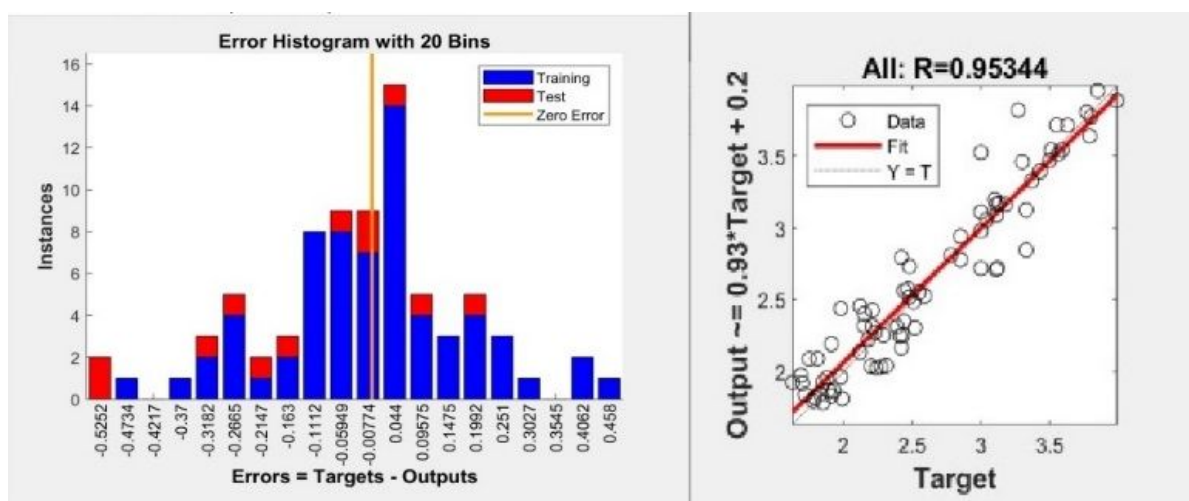
№ ИНС	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Относительная погрешность, %	4,18	3,99	5,63	7,26	6,07	8,02	5,13	15,56	1,98



а



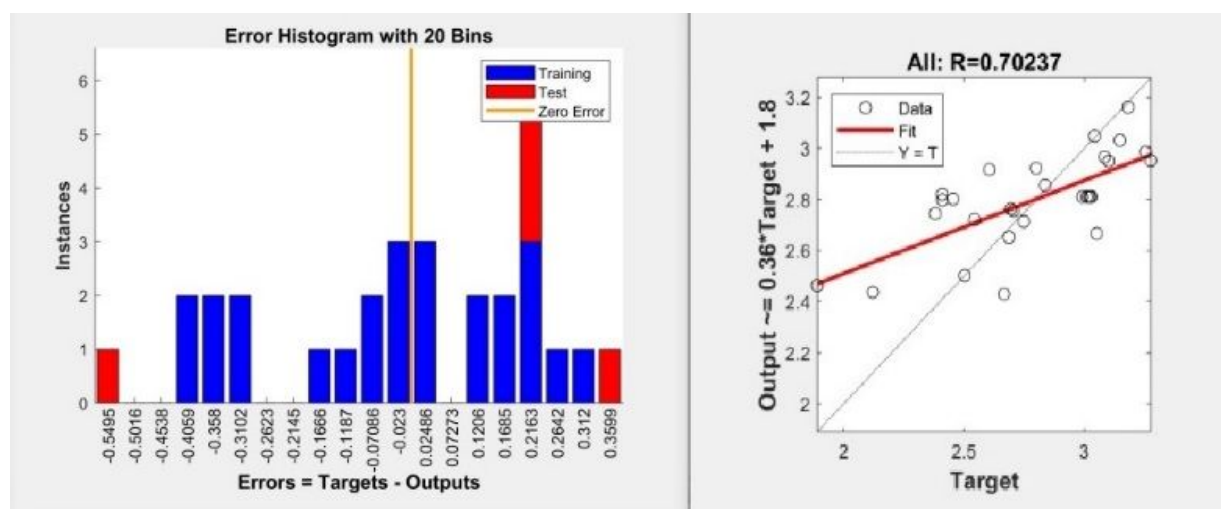
б



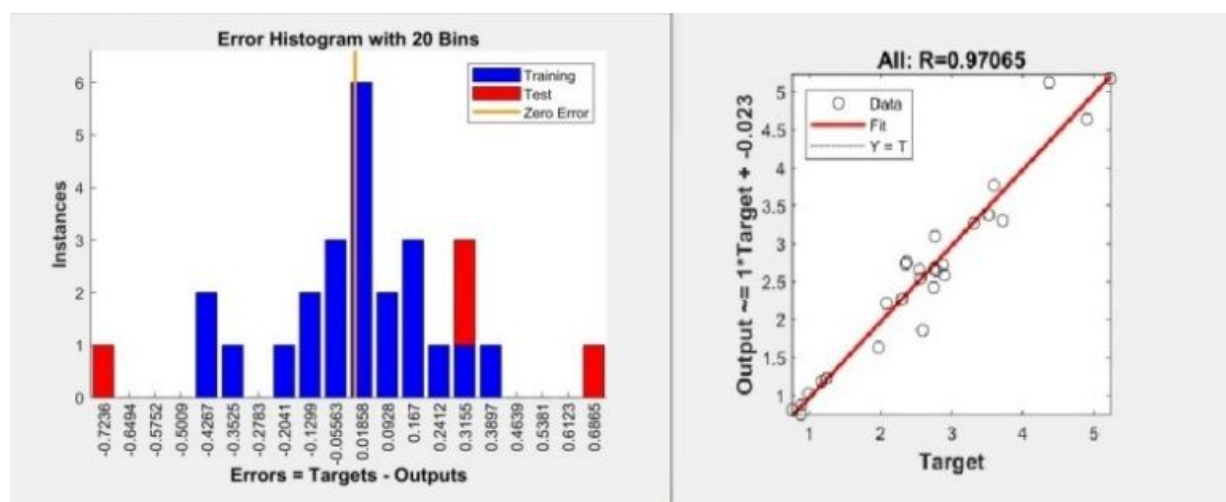
в

Рис. 1. Гистограмма ошибок и график регрессии (начало):

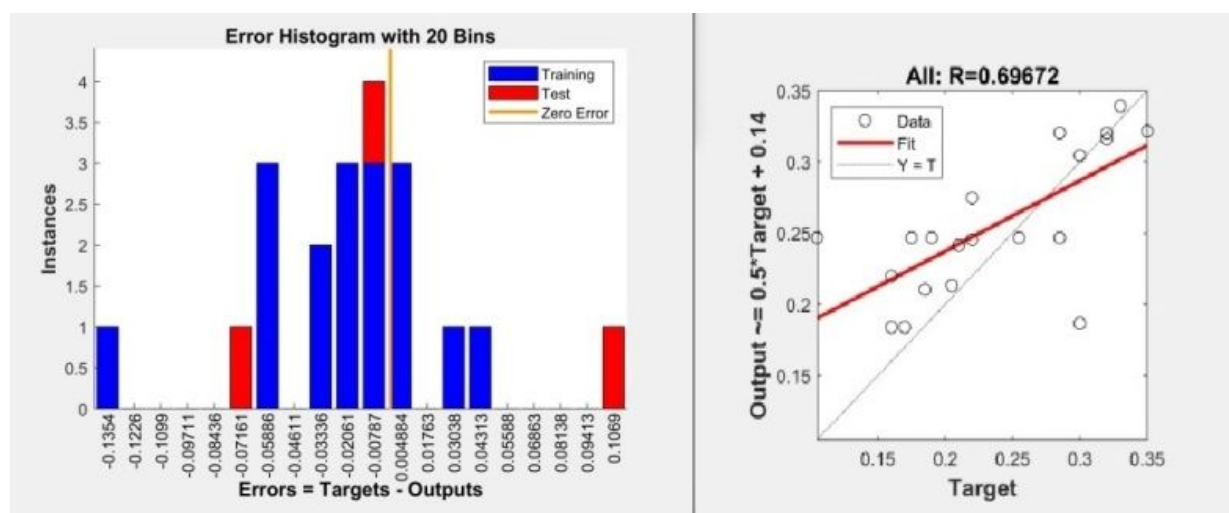
а – ИНС № 1; б – ИНС № 2; в – ИНС № 3;



2



0



e

Рис. 1. Гистограмма ошибок и график регрессии (продолжение):

г – ИНС №4; д – ИНС №5; е – ИНС №6

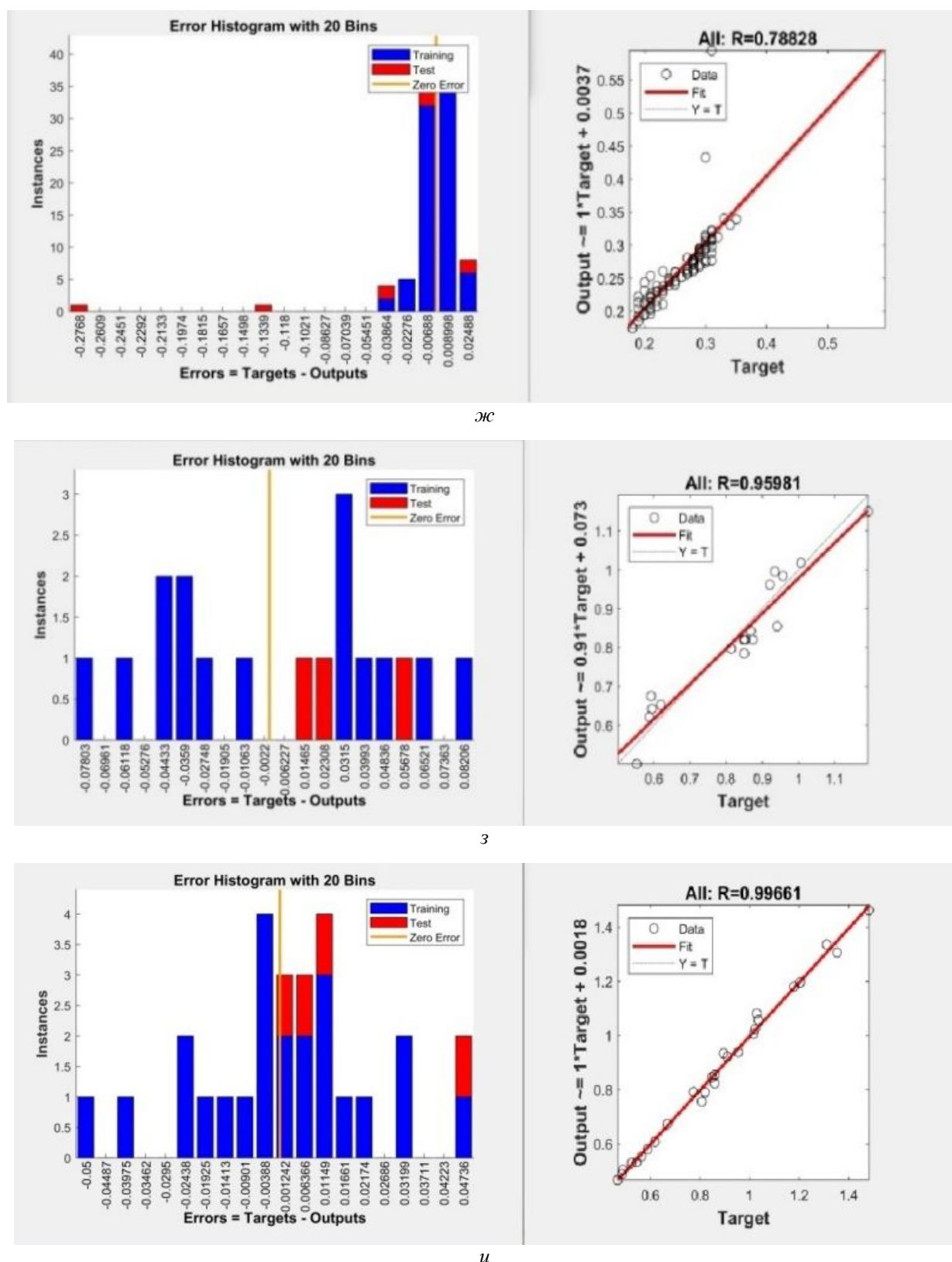


Рис. 1. Гистограмма ошибок и график регрессии (окончание):

г – ИНС №4; д – ИНС №5; е – ИНС № 6

Как видно из таблицы, построенные нейронные сети обладают хорошей точностью, для большинства из них относительная погрешность не превышает 10 %, за исключением сети № 8,

погрешность которой составляет 15 %, что связано с особенностями исходных данных. Несмотря на приемлемую точность представленные модели узконаправлены и могут использоваться

только для одного конкретного материала. Поэтому на следующем этапе исследования принято решение объединить отдельные исходные данные в определенные группы, тем самым усовершенствовать и расширить универсальность нейронных сетей. Для более корректной работы объединенных нейронных сетей, рационально начать объединение по признаку близости значений исходных данных. Таким образом, сформированы следующие нейросетевые модели:

1. Объединенная нейронная сеть 1_3 (данные сетей № 1 и № 3) для мягких материалов – цветных металлов и сплавов, включающая данные по обработке алюминия и латуни.

2. Объединенная нейронная сеть 2_4 (данные сетей № 2 и № 4) по обработке нержавеющей стали.

3. Объединенная нейронная сеть 6_7 (данные сетей № 6 и № 7) по обработке конструкционных сталей.

4. Объединенная нейронная сеть 8_9 (данные сетей № 8 и № 9) по обработке высокопрочных материалов: жаропрочного сплава и инструментальной штамповой стали.

В табл. 3 представлены объединенные данные условий обработки указанных групп материалов и полученная точность нейросетевых моделей, а на рис. 2 – гистограммы ошибок и графики регрессии, указанных нейронных сетей.

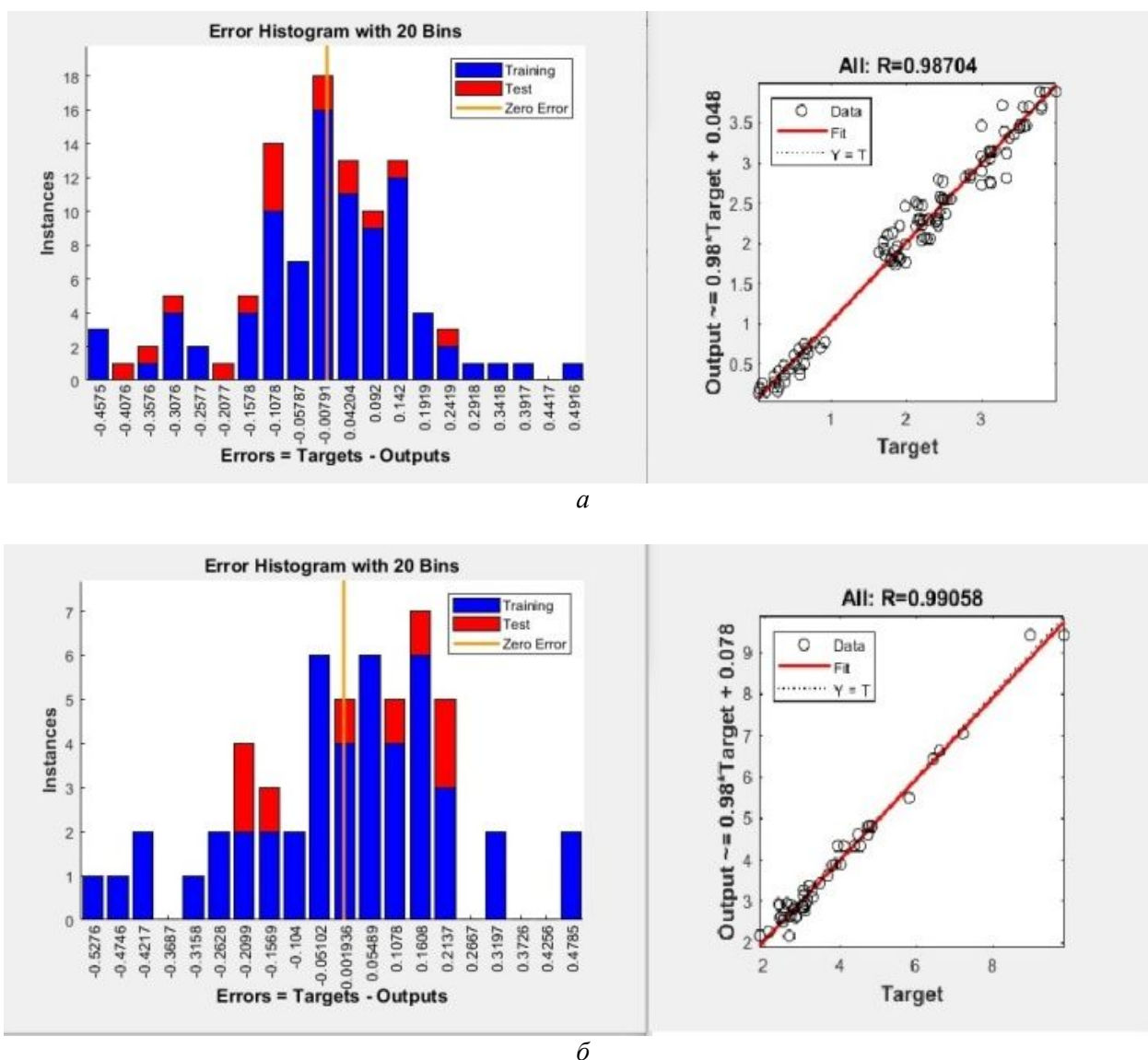
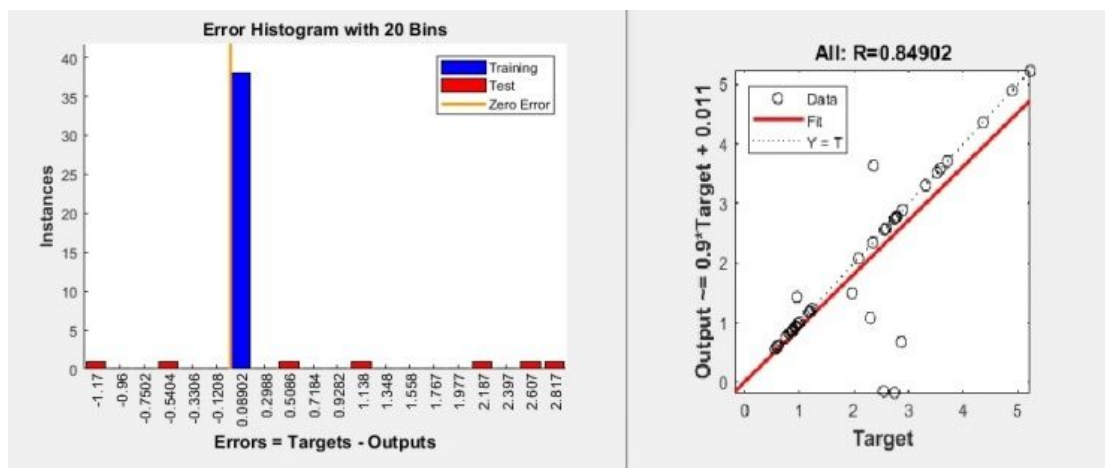
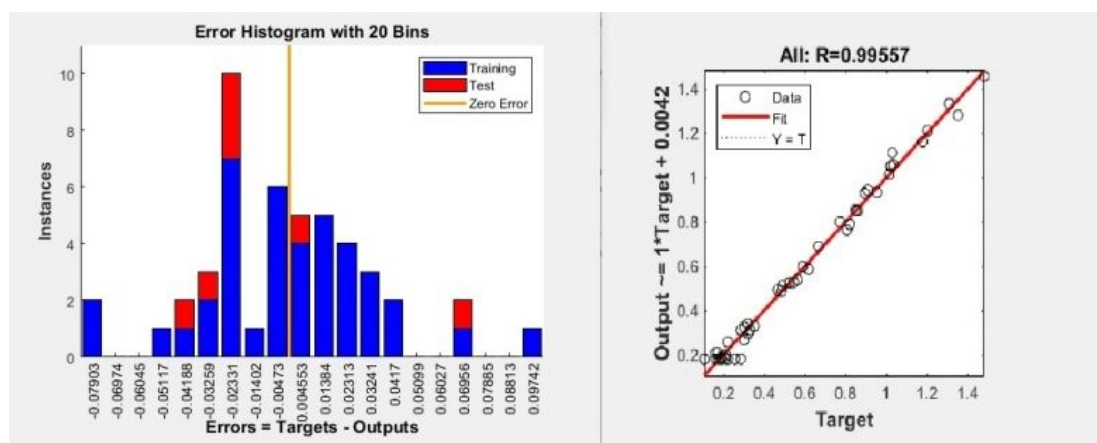


Рис. 2. Гистограмма ошибок и график регрессии (начало):
а – ИНС 1_3; б – ИНС 2_4;



6



2

Рис. 2. Гистограмма ошибок и график регрессии (окончание):

в – ИНС 6_7; г – ИНС 8_9

Таблица 3

Результаты первично объединенных нейронных сетей

№ ИНС	Обрабатываемый материал	Твердость	Диапазон скорости V, м/мин	Диапазон подачи S, мм/об	Диапазон глубины резания t, мм	Объем данных	Относительная погрешность, %
1_3	Алюминиевый сплав, латунь	80–90	28–79,8	0,002–4,8	0,2–1	105	6,44
2_4	Нержавеющие стали IDM 8365 и 1Cr18Ni9Ti	210	70–313,2	0,096–0,6	0,08–2,34	54	4,55
6_7	Конструкционные стали 9SMnPb28K и сталь 50	170–230	71–283	0,1–0,25	0,5–1	45	9,08
8_9	Жаропрочный сплав Inconel 718 и инструментальная штамповая сталь 4X5MФ1C	300 – 373	47,5–185	0,083–0,72	0,1–0,5	47	4,52

Как видно из графиков, объединенные нейронные сети показывают гораздо лучшие результаты, чем отдельные. Распределение погрешностей более приближено к нормальному распределению Гаусса, большинство отклонений группируется вблизи золотого сечения. Однако некоторые тестовые данные имеют существенное от-

клонение, наиболее ярко это выражено у нейронной сети 6_7. Такой результат получен, видимо вследствие недостаточного перекрытия значений скорости резания и малого объема данных.

На основании положительного результата объединения данных отдельных нейронных сетей был предпринят следующий шаг объедине-

ния сетей по признаку укрупнения групп обрабатываемых материалов и расширения диапазонов режимов резания. В отличие от предыдущего объединения в данном случае отдельные исходные данные вошли в состав нескольких нейронных сетей. Это было выполнено с целью выявления влияния диапазонов изменения входных параметров на точность выходного параметра. Таким образом, были созданы три укрупненные нейронные сети, данные в которых частично перекрываются:

1. Комбинированная нейронная сеть 2_4_5_6_7 (данные сетей № 2, № 4, № 5-7), включающая условия обработки нержавеющей, низколегированных и конструкционных сталей.

2. Комбинированная нейронная сеть 1_2_3_4_5_6_7 (данные сетей № 1-7), включающая условия обработки цветных металлов, нержавеющей, низколегированных и конструкционных сталей.

3. Комбинированная нейронная сеть 2_4_5_6_7_8_9 (данные сетей № 2, № 4-9), включающая условия обработки нержавеющей, низколегированных, конструкционных сталей и высокопрочных материалов (жаропрочного сплава и инструментальной стали).

На рис. 3 представлены гистограммы ошибок и графики регрессии, указанных нейронных сетей, а в табл. 3 сведены данные условий обработки указанных групп материалов и полученная точность нейросетевых моделей.

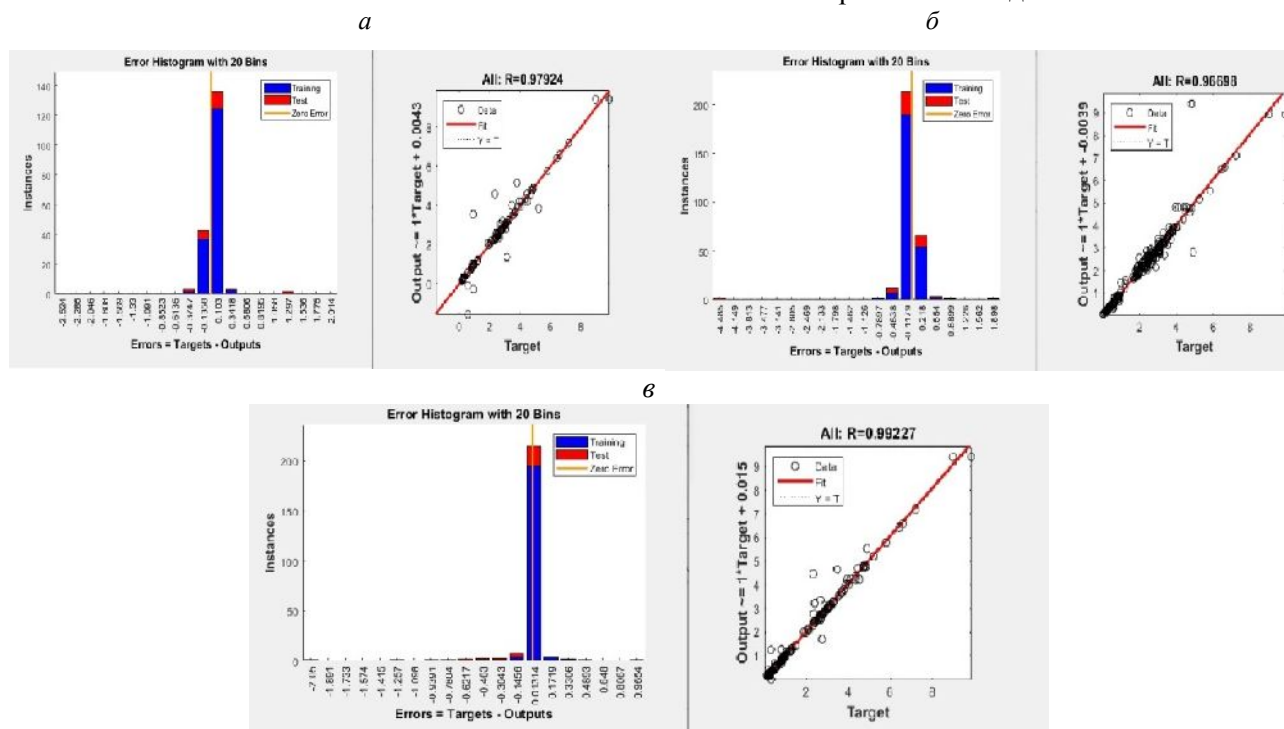


Рис. 3. Гистограмма ошибок и график регрессии: а – ИНС 2_4_5_6_7; б – ИНС 1_3_2_4_5_6_7; в – ИНС 2_4_5_6_7_8_9

Таблица 4

Результаты вторично объединенных нейронных сетей

№	Твердость материала	Диапазон скорости V , м/мин	Диапазон подачи S , мм/об	Диапазон глубины резания t , мм	Объем данных	Относительная погрешность, %
1	Нейронная сеть 2_4_5_6_7 для обработки материалов: нержавеющей стали IDM 8365 и 1Cr18Ni9Ti, низколегированная сталь, конструкционные стали 9SMnPb28K и сталь 50					
	170–230	70–313,2	0,03–0,6	0,08–2,34	196	6,74
2	Нейронная сеть 1_3_2_4_5_6_7 для обработки материалов: алюминиевый сплав, латунь, нержавеющей стали IDM 8365 и 1Cr18Ni9Ti, низколегированная сталь, конструкционные стали 9SMnPb28K и сталь 50					
	80–230	28–313,2	0,002–4,8	0,08–2,34	301	11,47
3	Нейронная сеть 2_4_5_6_7_8_9 по обработке материалов: нержавеющей стали IDM 8365 и 1Cr18Ni9Ti, низколегированная сталь, конструкционные стали 9SMnPb28K и сталь 50, жаропрочный сплав Inconel718 и инструментальная штамповая сталь 4X5MФ1C					
	170–373	47,5–313,2	0,03–0,72	0,08–2,34	243	4,50

Полученные результаты объединения являются вполне удовлетворительными. Наименьшую точность с погрешностью 11 % имеет 2 сеть, в состав которой вошли как мягкие материалы (алюминий и латунь), так и более твердые (конструкционные и нержавеющие стали) с разностью твердости в 150 единиц НВ. При этом 3 сеть имеет разницу в твердости включенных материалов 200 единиц НВ, но существенно меньшую погрешность 4,5 %. Это связано с условиями формирования шероховатости поверхности для отдельных материалов. Закономерности формирования шероховатости при обработке различных типов сталей являются более близкими, в отличие от обработки алюминия и латуни, имеющих существенно более высокую теплопроводность и склонных к наростообразованию.

На последнем этапе исследования выполнено объединение всех имеющихся экспериментальных данных в одну нейронную сеть. Нейронная сеть 1_2_3_4_5_6_7_8_9 предусматривает

возможность прогнозирования шероховатости поверхности для широкого диапазона обрабатываемых материалов и режимов резания: от самых мягких (алюминий, латунь) до наиболее твердых (жаропрочный сплав, инструментальная сталь), включая материалы средней твердости (нержавеющие, конструкционные и низколегированные стали). Такой охват даст более широкую применимость проектируемой нейронной сети. Для ее создания были использованы выборки всех предыдущих нейронных сетей, обучение производилось по алгоритму Байесовской регуляризации при созданных 300 скрытых слоях.

В результате была получена рабочая нейронная сеть, обладающая наибольшей универсальностью по сравнению с ранее представленными. На рис. 4 изображены гистограмма ошибок и график регрессии. После тестирования сеть показывает среднюю относительную погрешность результата в 7,64 %. Итоговые характеристики данной сети сведены в табл. 5.

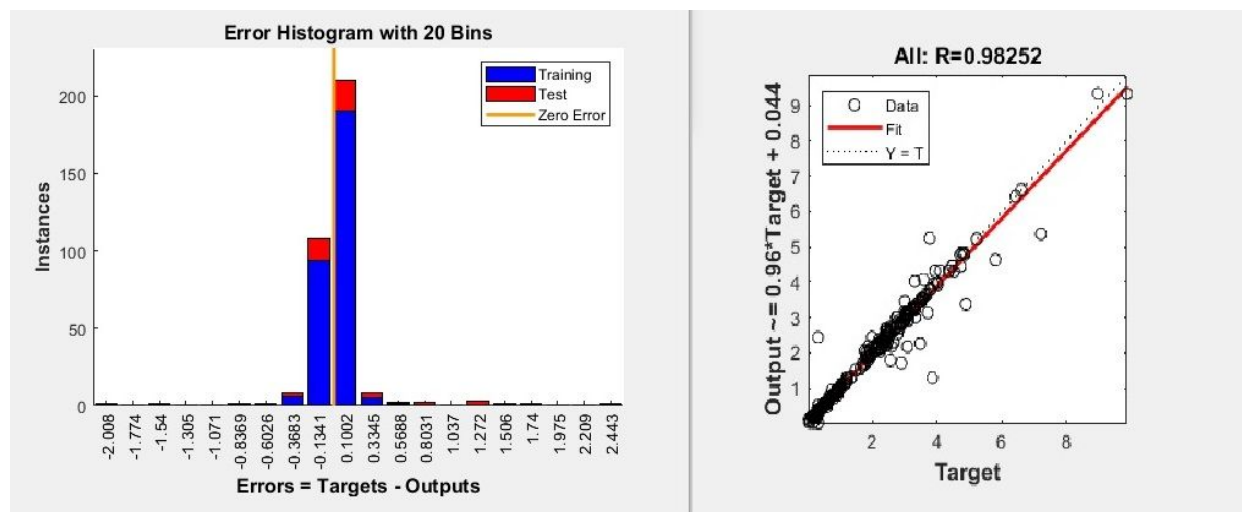


Рис. 4. Графики процесса обучения нейронной сети 1_2_3_4_5_6_7_8_9

Таблица 5

Погрешности проверочных выборок

№ ИНС	1 2 3 4 5 6 7 8 9
Обрабатываемый материал	Алюминиевый сплав, латунь, нержавеющие стали IDМ 8365 и 1Cr18Ni9Ti, низколегированная сталь, конструкционные стали 9SMnPb28K и сталь 50, жаропрочный сплав Inconel 718 и инструментальная штамповая сталь 4X5MФ1C
Твердость	80–373
Диапазон скорости V, м/мин	28–313,2
Диапазон подач S, мм/об	0,002–4,8
Диапазон глубины резания t, мм	0,08–2,34
Объем данных	348
Относительная погрешность, %	7,64

Выводы. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования шероховатости обрабатываемой поверхности при механической обработке позволяет создавать как узкоспециализированные модели для определенных материалов, так и широкоуниверсальные модели для групп материалов с различными физико-механическими свойствами при наличии достаточной базы данных для обучения сети. В зависимости от объема исходных данных и диапазонов их изменения представленные нейросетевые модели показали относительную погрешность в пределах от 2 % до 15 %. Хорошие результаты получены при объединении отдельных баз данных в укрупненные группы по признаку физико-механических свойств и создании на их основе комбинированных нейросетевых моделей. Так, получена широкоуниверсальная модель прогнозирования шероховатости при фрезеровании различных материалов: от наиболее мягких цветных металлов до высокотвердых жаропрочных сплавов, относительная погрешность которой составляет 8 %. Для дальнейшего совершенствования данной нейронной сети требуется увеличение объема базы данных по обработке различных материалов, исключение некорректных данных, а так же возможное добавление новых входных параметров и их комбинирование при широком диапазоне обрабатываемых материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А. Прогнозирование шероховатости при чистовом фрезеровании с использованием нейронных сетей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. Том 4, №10. С. 135–141.
2. Palani S., Kesavanarayana Y. Prediction of Surface Roughness in End Milling Process by Machine Vision Using Neuro Fuzzy Network // International Conference on Science, Engineering and Management Research (ICSEMR). 2014. P. 1–5.
3. Kovač P., Savković B., Gostimirovic M., Jesic D., Mankova I. Modeling of the Machining Surface Roughness Parameters for Steel Difficult to Machining // ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU” REȘITA ANUL XXIV. 2017. Vol. 1. Pp. 1453–7397.
4. Soltan I.M., Eltaib M. E. H., El-Zahry R.M. Surface roughness prediction in end milling using multiple regression and adaptive neuro-fuzzy inference system // Fourth Assiut University Int. Conf. on Mech. Eng. Advanced Tech. For Indus. Prod., 2006. Pp. 614–620.
5. Xiao M., Shen X., Ma Y., Yang F., Gao N., Wei W., Wu D. Prediction of surface roughness and optimization of cutting parameters of stainless steel turning based on RSM // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2018. Pp. 1–16.
6. Parmar J.G., Makwana A. Prediction of surface roughness for end milling process using Artificial Neural Network // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012 Vol. 2. Pp. 1006–1013.
7. Davim J.P. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments // Journal of materials processing technology. 2001. Vol. 116. Pp. 305–308.
8. Sahin Y., Motorcu A.R. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2008. Vol. 26. Pp. 84–90.
9. Sarkar B., Reddy M.M., Debnath S. Effect of machining parameters on surface finish of Inconel 718 in end milling // MATEC Web of Conferences 95. 2017. P. 1–6.
10. Tao F., Weijun L., Jibin Z. Optimization of cutting parameters using multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition // Journal of Vibroengineering. 2013. Vol. 15. Pp. 833–844.

Информация об авторах

Ерыгин Евгений Вячеславович, аспирант кафедры технология машиностроения. E-mail: erygin.evgeny@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. E-mail: tanduun@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 24.10.2020 г.

© Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А., 2020

*Erygin E.V., Dujun T.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

*E-mail: erygin.evgeny@gmail.com

DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORKS FOR FORECASTING ROUGHNESS WHEN MILLING VARIOUS MATERIALS

Abstract. The article presents a methodology for the development and testing results of artificial neural networks for predicting roughness in finishing milling. Experimental data of various researchers in the processing of materials with different physical and mechanical properties are used as the initial data base for the creation and training of neural networks. The value of material hardness is taken as the main identifier of physical and mechanical properties. In addition to the hardness of the material, the input parameters of the nets are also the cutting modes: tool feed, depth and cutting speed. The data of the obtained roughness are used for several groups of materials: non-ferrous metals, structural and stainless steels, heat-resistant alloys and tool steel. Nine highly specialized neural networks have been created that predict roughness when milling a certain material, a number of combined networks by combining several databases, including a broad-based neural network for several groups of materials. A comparative analysis of the results of testing the developed neural networks by the criterion of relative error is carried out. Most of the presented neural networks have a satisfactory error not exceeding 10%. Individual neural networks have higher accuracy, showing an error within 5 %.

Keywords: artificial neural networks (ANN), combined ANN, roughness, finish milling.

REFERENCES

1. Erygin E.V., Dujun T.A. Prediction of roughness in finishing milling using neural networks [Prognostirovanie sherohovatosti pri chistovom frezerovanii s ispol'zovaniem nejronnyh setej]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 10. Pp. 135–141.
2. Palani S., Kesavanarayana Y. Prediction of Surface Roughness in End Milling Process by Machine Vision Using Neuro Fuzzy Network. International Conference on Science, Engineering and Management Research (ICSEMR). 2014. Pp. 1–5.
3. Kovač P., Savković B., Gostimirovic M., Jesic D., Mankova I. Modeling of the Machining Surface Roughness Parameters for Steel Difficult to Machining. ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU” REȘITA ANUL XXIV. 2017. Vol. 1. Pp. 1453–17397.
4. Soltan I. M., Eltaib M. E. H., El-Zahry R. M. Surface roughness prediction in end milling using multiple regression and adaptive neuro-fuzzy inference system. Fourth Assiut University Int. Conf. on Mech. Eng. Advanced Tech. For Indus. Prod., 2006. Pp. 614–620.
5. Xiao M., Shen X., Ma Y., Yang F., Gao N., Wei W., Wu D. Prediction of surface roughness and optimization of cutting parameters of stainless steel turning based on RSM. Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2018. Pp. 1–16.
6. Parmar J. G., Makwana A. Prediction of surface roughness for end milling process using Artificial Neural Network. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2012 Vol. 2. Pp. 1006–1013.
7. Davim J. P. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. Journal of materials processing technology. 2001. Vol. 116. Pp. 305–308.
8. Sahin Y., Motorcu A.R. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2008. Vol. 26. Pp. 84–90.
9. Sarkar B., Reddy M. M., Debnath S. Effect of machining parameters on surface finish of Inconel 718 in end milling. MATEC Web of Conferences 95. 2017. Pp. 1–6.
10. Tao F., Weijun L., Jibin Z. Optimization of cutting parameters using multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. Journal of Vibroengineering. 2013. Vol. 15. Pp. 833–844.

Information about the authors

Erygin, Evgeny V. Postgraduate student. E-mail: erygin.evgeny@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Dujun, Tatiana A. DSc, professor. E-mail: tanduun@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 24.10.2020

Для цитирования:

Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А. Разработка нейронных сетей для прогнозирования шероховатости при фрезеровании различных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 113–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-113-124

For citation:

Erygin E.V., Dujun T.A. Development of neural networks for forecasting roughness when milling various materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 113–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-113-124

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131

Семикопенко И.А., Воронов В.П., Беляев Д.А., Бороздин Е.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: semickopencko.i@yandex.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. В данной статье дан анализ движения частиц материала в центральной и периферийной частях рабочей камеры дисковой мельницы. Представлены схема дисковой мельницы, а также схема движения частиц в ее рабочей камере. Измельчающие элементы представляют собой лопатки в форме параболы, расположенные на дисках, имеющих наклонную поверхность. Найдено выражение для определения времени t нахождения частицы внутри камеры помола мельницы. Определено, что данное время зависит от геометрических (x_1 ; y_1 ; x_2 ; y_2 ; β) и технологических (ω) параметров. Зависимость времени t нахождения от изменения угла β отклонения направления поверхности криволинейной лопатки от радиального направления показана на рис. 3. В результате теоретических исследований получено аналитическое выражение, которое позволяет определить размер частиц на выходе из камеры помола. Согласно найденному выражению, конечный размер частиц на выходе из камеры помола зависит от таких параметров, как d_0 , σ , ω , β и t . Вследствие этого была построена зависимость (рис. 4) отношения начального размера частиц к конечному ($\frac{d_0}{d_k}$) от изменения времени t . Согласно полученным графикам, при увеличении угла β уменьшается время t пребывания частицы в камере помола, вследствие чего увеличивается конечный размер частицы на выходе.

Ключевые слова: теоретическое исследование, дисковая мельница, измельчение, камера помола, парабола.

Введение. Дисковые мельницы являются одним из видов малотоннажного оборудования для помола, смешения и активации различных материалов [1]. Преимущественными факторами использования данного оборудования являются его относительно малая установленная мощность, малые габариты, возможность автоматизации процесса [2].

Тем не менее с целью повышения эффективности работы дисковых мельниц продолжают поиски новых конструктивно-технических решений, внедрение которых требует дополнений к теоретическим расчетам конструктивных и технологических параметров.

На рис. 1 представлена схема рабочей камеры дисковой мельницы с наклонной поверхностью и лопатками в форме параболы. Дисковая мельница работает следующим образом: исходный материал подается через загрузочную воронку 1 и проходя через вертикальный цилиндрический патрубок 2 в рабочую камеру попадает на разбрасывающие лопасти 3 нижнего диска 4, имеющего наклонную поверхность к горизонту под углом α . Материал под действием центробежных сил направляется в зону действия лопаток 6,7 принадлежащим дискам 4 и 5 соответственно. Частицы материала взаимодействуют с рабочей поверхностью криволинейных

лопаток, продвигаясь из центральной части камеры к периферийной. [3].

При данном перемещении частиц во время встречного вращения дисков 4 и 5 периодически изменяется зазор между верхней поверхностью нижнего диска 4 и нижней поверхностью верхнего 5 диска по ходу движения измельчаемого материала. При противоположном направлении вращения верхнего 5 и нижнего 4 диска рабочее пространство между ними последовательно сужается и расширяется, причем данные изменения рабочего пространства имеют высокочастотный циклический характер. Вследствие этого интенсивность движения и взаимодействия частиц с лопатками 6,7 и между собой возрастает. Здесь возникают нагрузки на измельчаемый материал, связанные с раздавливающими силами, создаваемыми противоположно вращающимися верхним 5 и нижним 4 дисками. Готовый продукт вылетает из корпуса через разгрузочный патрубок 8 [4].

В данной статье поставлены задачи определения зависимости крупности частиц на выходе из камеры помола от времени их нахождения внутри нее, исходя из геометрических (x_1 ; y_1 ; x_2 ; y_2 ; β) и технологических (ω) параметров. [5].

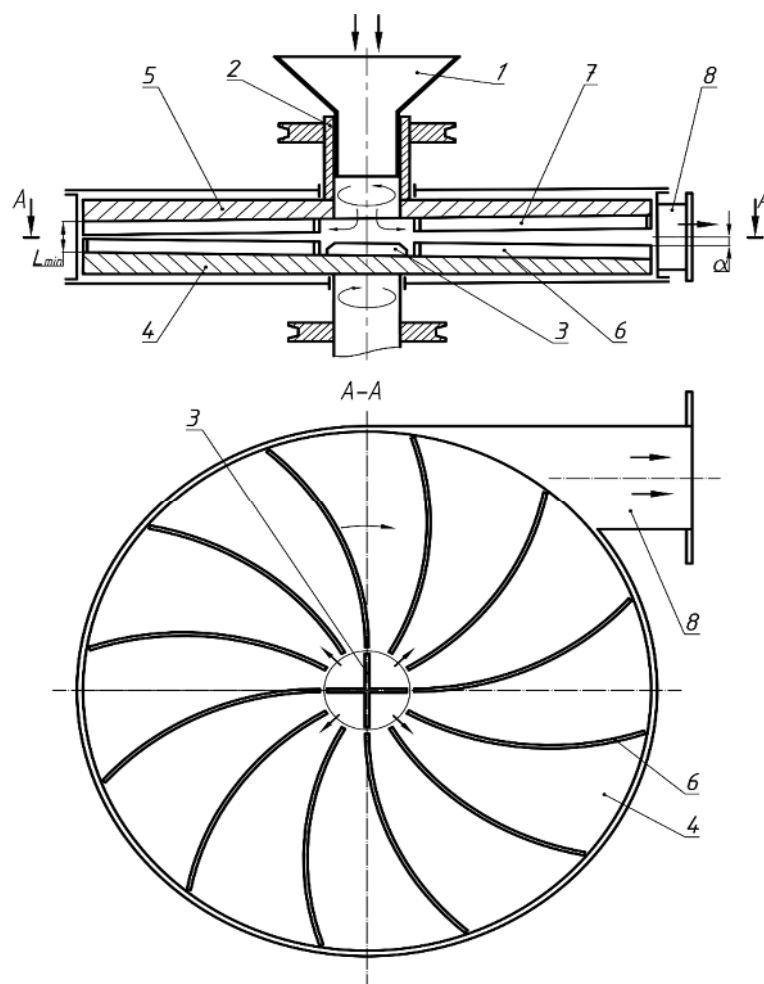


Рис. 1. Схема дисковой мельницы с наклонной рабочей поверхностью.
1 – загрузочная воронка; 2 – цилиндрический патрубок; 3 – разбрасывающие лопасти; 4 – нижний диск; 5 – верхний диск; 6, 7 – лопасти; 8 – разгрузочный патрубок.

Основная часть. Найдем время пребывания частицы материала в рабочей камере дисковой мельницы в зависимости от конструктивных и технологических параметров. Предположим, что криволинейные лопасти в корпусе дисковой мельницы имеют форму в виде участка параболы. [6]. Для определения длины криволинейного участка лопасти введем двумерную систему координат, представленную на рис. 2.

Согласно расчетной схеме на рис. 2, уравнение участка параболы имеет вид:

$$y = ax^2 + bx. \quad (1)$$

Для нахождения коэффициентов «a» и «b» необходимо воспользоваться координатами начала (x_1 ; y_1) и конца (x_2 ; y_2) участка параболы. На основании сказанного получаем следующую систему уравнений [7]:

$$\begin{cases} y_1 = ax_1^2 + bx_1; \\ y_2 = ax_2^2 + bx_2. \end{cases} \quad (2)$$

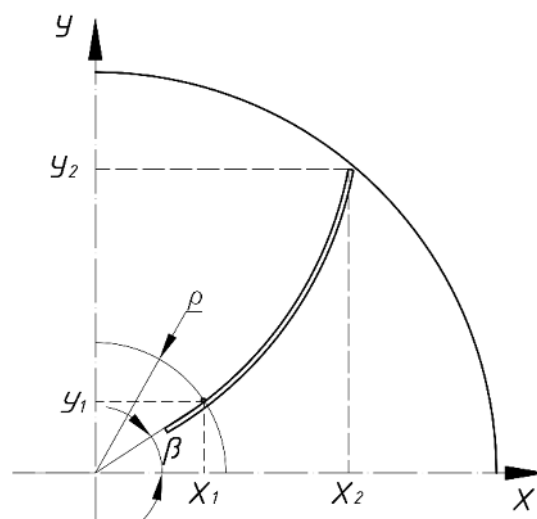


Рис. 2. Расчетная схема для определения длины криволинейной лопасти.

Решение системы (2) найдем на основании правила Крамера. [8]. Для этого находим следующие определители системы (2):

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1^2 & x_1 \\ x_2^2 & x_2 \end{vmatrix} = x_1^2 \cdot x_2 - x_2^2 \cdot x_1 = x_1 \cdot x_2 (x_1 - x_2); \quad (3)$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} y_1 & x_1 \\ y_2 & x_2 \end{vmatrix} = y_1 \cdot x_2 - y_2 \cdot x_1; \quad (4)$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} x_1^2 & y_1 \\ x_2^2 & y_2 \end{vmatrix} = x_1^2 \cdot y_2 - x_2^2 \cdot y_1. \quad (5)$$

На основании полученных соотношений (3) – (5) находим

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{y_1 \cdot x_2 - y_2 \cdot x_1}{x_1 \cdot x_2 (x_1 - x_2)}; \quad (6)$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{x_1^2 \cdot y_2 - x_2^2 \cdot y_1}{x_1 \cdot x_2 (x_1 - x_2)}. \quad (7)$$

Длину криволинейного участка «L» найдем на основании соотношения [9]:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx. \quad (8)$$

На основании (1) находим:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = (2ax + b)^2. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (8) приводит к следующему результату:

$$L = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + (2ax + b)^2} dx. \quad (10)$$

Для вычисления интеграла (10) произведем следующую замену переменной интегрирования согласно:

$$\xi = 2ax + b; \quad (11)$$

$$dx = \frac{d\xi}{2a}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) интеграл (10) принимает вид:

$$L = \frac{1}{2a} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \sqrt{1 + \xi^2} d\xi, \quad (13)$$

здесь

$$\xi_1 = 2ax_1 + b; \quad (14)$$

$$\xi_2 = 2ax_2 + b. \quad (15)$$

Вычисление интеграла (13) приводит к следующему результату:

$$L = \frac{1}{4a} \left(\xi_2 \sqrt{1 + \xi_2^2} - \xi_1 \sqrt{1 + \xi_1^2} + \ln \frac{\xi_2 + \sqrt{1 + \xi_2^2}}{\xi_1 + \sqrt{1 + \xi_1^2}} \right). \quad (16)$$

При попадании частиц материала на поверхность криволинейной лопатки частицы материала начинают двигаться вдоль её поверхности со скоростью, равной [10]:

$$g = \frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot f} (\cos \beta - f \sin \beta), \quad (17)$$

где ω – частота вращения диска;

ρ – расстояние от оси вращения диска до начала установленных криволинейных лопаток;

β – угол отклонения направления поверхности лопатки от радиального направления;

f – коэффициент трения частицы материала о поверхность лопатки.

На основании полученных соотношений определяем τ – время нахождения частицы материала в рабочей камере [11].:

$$\tau = \frac{L}{g}, \quad (18)$$

которое с учетом формул (16) и (17) принимает вид:

$$\tau = \frac{f \left(\xi_2 \sqrt{1 + \xi_2^2} - \xi_1 \sqrt{1 + \xi_1^2} + \ln \left(\frac{\xi_2 + \sqrt{1 + \xi_2^2}}{\xi_1 + \sqrt{1 + \xi_1^2}} \right) \right)}{2 \cdot a \cdot \omega \cdot \rho (\cos \beta - f \sin \beta)}. \quad (19)$$

Таким образом, полученное выражение (19) определяет время пребывания частицы материала в рабочей камере в зависимости от конструктивных и технологических параметров.

На рис.3 показана зависимость времени τ движения частицы вдоль рабочей поверхности лопатки от угла β отклонения поверхности лопатки от радиального направления. Из графика следует что, в зависимости от угла β , координата начала взаимодействия частицы с лопаткой будет изменяться, вследствие чего время τ пребывания материала в рабочей камере так же будет различным.

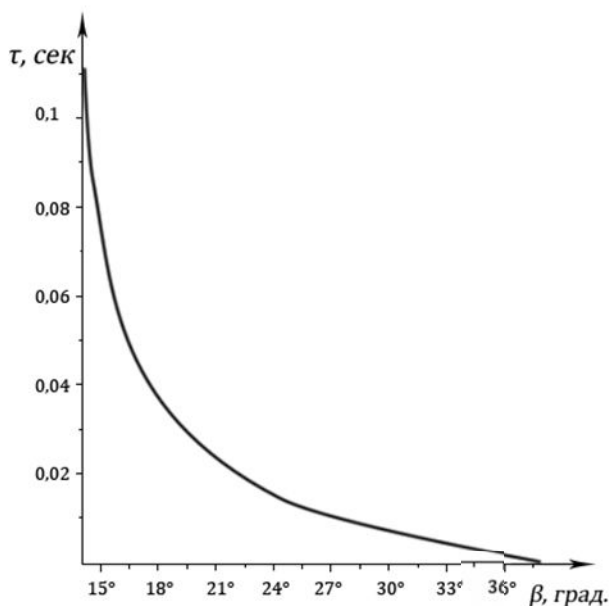


Рис. 3. График зависимости времени τ движения частицы вдоль внутренней поверхности криволинейной лопатки от угла β отклонения направления ее поверхности

Таким образом, на графике видно, как нелинейно меняется время τ нахождения частицы в рабочей камере в зависимости от угла β отклонения поверхности криволинейной лопатки от радиального направления.

Теперь определим конечный размер частиц при их разрушении в рабочей камере дисковой мельницы. Рассмотрим разрушение частиц материала в рабочей камере дисковой мельницы за счет раздавливающих и истирающих усилий, создаваемых криволинейными лопатками. Описание разрушения частиц материала под действием раздавливающего и истирающего воздействия можно привести в рамках неоднородного Марковского процесса. Согласно результату работы [12], математическое описание изменения среднего размера частиц материала в рабочей камере дисковой мельницы можно провести на основании следующего уравнения:

$$\frac{dz}{dz} = -\alpha \cdot \gamma \cdot \omega \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \cdot z, \quad (20)$$

где z – среднее значение размера частиц материала; α – коэффициент истирания; γ – доля частиц материала, подвергающегося раздавливающему воздействию [13].

Величину коэффициента α можно найти на основании следующего выражения:

$$\alpha = \frac{d_0 - d_k}{L}, \quad (21)$$

здесь d_k – среднее значение конечного размера частицы материала после схода с поверхности

лопатки; d_0 – начальное значение размера частицы материала при входе на поверхность лопатки.

Согласно схемы, представленной на рис. 1, величина размера d_0 должна удовлетворять следующему соотношению:

$$d_0 \leq l_{\min}, \quad (22)$$

где $l_{\min}$ – минимальный зазор между нижним и верхним дисками.

Согласно закону Гука можно записать следующее соотношение:

$$\frac{d_0 - d_k}{d_0} = \frac{\sigma}{E}, \quad (23)$$

где E – модуль Юнга; σ – величина напряжений, возникающих на поверхности частицы материала.

Подстановка (23) в соотношение (21) приводит к следующему результату:

$$\alpha = \frac{d_0}{L} \cdot \frac{\sigma}{E}. \quad (24)$$

В дальнейшем предполагаем, что все частицы, поступающие на лопатки, подвергаются разрушению ($\gamma = 1$). Поэтому на основании сказанного и с учетом (24) уравнение (20) принимает вид:

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{d_0 \cdot \sigma \cdot \omega}{L \cdot E} \left(1 - \frac{t}{z}\right) \cdot z. \quad (25)$$

Дифференциальное уравнение (25) с разделяющимися переменными z и t можно привести к следующему виду:

$$\frac{dz}{z} = -\frac{d_0 \cdot \sigma \cdot \omega}{L \cdot E} \left(1 - \frac{t}{z}\right) dt. \quad (26)$$

Проведем интегрирование в очевидных пределах по переменной z от начального значения d_0 до конечного d_k и переменной t от начального значения «0» до конечного τ [14].:

$$\int_{d_0}^{d_k} \frac{dz}{z} = -\frac{d_0 \cdot \sigma \cdot \omega}{L \cdot E} \int_0^\tau \left(1 - \frac{t}{z}\right) dt. \quad (27)$$

Нахождение определенных интегралов в соотношении (27) приводит к следующему результату:

$$\ln \left(\frac{d_k}{d_0}\right) = -\frac{d_0 \cdot \sigma \cdot \omega \cdot \tau}{2 \cdot L \cdot E}. \quad (28)$$

На основании (28) находим:

$$d_k = d_0 \cdot \exp \left(-\frac{d_0 \cdot \sigma \cdot \omega \cdot \tau}{2 \cdot L \cdot E}\right). \quad (29)$$

На основании схемы, представленной на рис. 1 для значения d_k должно выполняться соотношение:

$$d_k \leq l_{min}. \quad (30)$$

Полученное соотношение (29) позволяет оценить конечное значение размера частиц материала при их сходе с поверхности криволинейной лопатки в зависимости от конструктивных и

технологических параметров. Ниже показана (рис. 4) зависимость отношения начального размера частицы к конечному размеру $\frac{d_0}{d_k}$ от времени τ взаимодействия частиц с лопатками. [15].

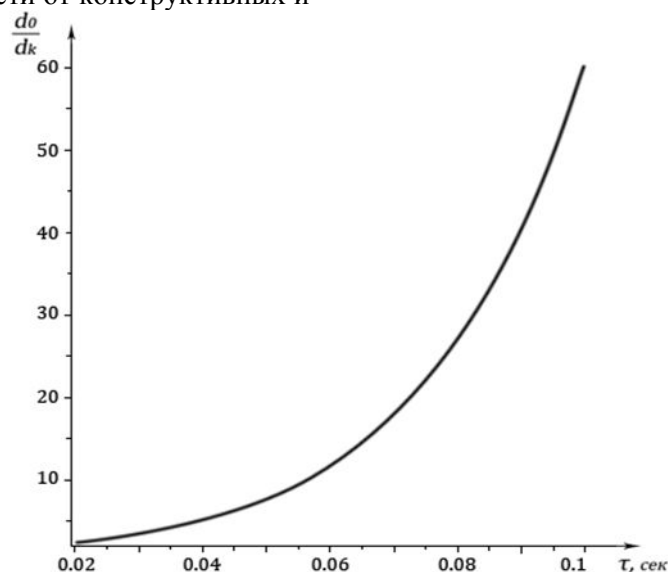


Рис. 4. График зависимости степени измельчения от времени взаимодействия частиц с криволинейными лопатками диска.

Из графика видно, что при увеличении времени τ взаимодействие частиц с рабочей поверхностью лопаток соотношение начального и конечного размеров частиц нелинейно увеличивается.

Выводы. Результаты проведенного исследования позволяют определить наиболее рациональные конструктивные параметры при проектировании подобного рода машин, использующие в своей конструкции в качестве измельчающих элементов криволинейные лопатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа // Известия ВУЗов. Строительство. 2008. № 11-12. С. 93–96
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. М., Мир. 1985. 196 с.
3. Сиваченко Л.А. Современное технологическое машиностроение. Основные положения // Инженер-механик. 2010. № 4. С. 10–20.
4. Клочков Н.В., Блиничев В.Н., Бобков С.П., Пискунов А.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице // Известия ВУЗов. Химия и хим. технология. 1982. №2. С. 230–232.

5. Данилов Р.Г. Гипотеза механизма тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчатоподобным зацеплением // Промышленность стройматериалов и стройиндустрия. Энерго - и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Сб. докл. Междунар. конф. Ч.4. Белгород. 1997. С. 164–168.

6. Пат. 2687193, Российская Федерация, МПК В02С 13/20. Центробежный дисковый измельчитель / И.А. Семикопенко, Е.А. Бороздин, Д.В. Вавилов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. №2018126272; заявл. 16.07.2018; опубл. 07.05.2019. Бюл. №3. 6 с.

7. Богородский А.В., Блиничев В.Н., Лапшин В.Б. Интенсификация процесса измельчения в мельнице дезинтеграторного типа // Журн. Известия ВУЗов СССР. Химия и хим. технология. 1980. Т.23. №5. С. 643–645.

8. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики // Наука. 3-е изд. 1972. 410 с.

9. Киркач Н. Ф., Баласанян Р. А. Расчёт и проектирование деталей машин// Учебное пособие для техн. вузов. 3-е изд. Изд-во «Основа». 1991. 276 с.

10. Арзамасов Б.Н., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. Материаловедение: учебник для высших учебных-технических заведений // 2-е изд. Машиностроение. 1986. 384 с.

11. Бауман В.А. Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций // 2-е изд. Машиностроение. 1981. 320 с.

12. Блиничев В.Н., Ключков Н.В. Современные конструкции машин и аппаратов химических производств (мешалки, смесители, диспергаторы, мельницы) // Учеб. пособие по лекционному курсу МАХП. ИХТИ. 1980. 83 с.

13. Ходаков Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов // Строительство. 1972. 230 с.

14. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. // Т.1. 5-е изд. Машиностроение. 1978. 736 с.

15. Еремин Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов // Высш. шк. 1986. 280 с.

Информация об авторах

Семикопенко Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронов Виталий Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Беляев Денис Александрович, аспирант кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бороздин Егор Алексеевич, магистрант кафедры механического оборудования. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.11.2019 г.

© Семикопенко И.А., Воронов В.П., Беляев Д.А., Бороздин Е.А., 2020

Semikopenko I.A., Voronov V.P., Belyaev D.A., Borozdin E.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: semikopenko.i@yandex.ru*

THEORETICAL STUDY OF THE MATERIAL GRINDING PROCESS IN THE WORKING CHAMBER OF A DISK MILL

Abstract. This article analyzes the movement of material particles in the central and peripheral parts of the working chamber of a disk mill. A diagram of a disk mill and a diagram of the movement of particles in its working chamber are presented. The cutting elements are blades in the shape of a parabola located on the disks having an inclined surface. An expression is found for determining the time when a particle is located inside the grinding chamber of a mill. It is determined that this time depends on the geometric (x_1 ; y_1 ; x_2 ; y_2) and technological (ω) parameters. The dependence of the time spent on the change in the angle of deviation of the surface of the curved blade from the radial direction is shown in figure 3. As a result of theoretical research, an analytical expression is obtained that allows to determine the particle size at the output of the grinding chamber. According to the found expression, the final particle size at the output of the grinding chamber depends on such parameters as d_0 , σ , ω , β and τ . As a result, the dependence (figure 4) of the ratio of the initial particle size to the final one (d_0/d_k) on the time change τ is constructed. According to the obtained graphs, as the angle β increases, the particle time τ in the grinding chamber decreases, in result of which the final size of the particle at the output increases.

Keywords: theoretical research, disk mill, grinding, grinding chamber, parabola.

REFERENCES

1. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Penzev P.P., Theoretical studies of the speed of movement of material particles along the surface of the impact element of a mill of a disintegrator type [Teoreticheskiye issledovaniya skorosti dvizheniya chastits materiala vdol' poverkhnosti udarnogo elementa mel'nitsy dezintegratornogo tipa]. Proceedings Of

The Universities. Construction. 2008. No. 11–12. Pp. 93–96. (rus)

2. Kuhling X. Handbook of physics [Spravochnik po fizike]. M.: Mir, 1985. 196 p. (rus)

3. Sivachenko L. A. Modern technological machine-building. Basic principles. [Sovremennoye tekhnologicheskoye mashinostroyeniye. Osnovnyye polozheniya]. Mechanical engineer. 2010. No. 4. Pp. 10–20. (rus)

4. Klochkov N.V., Blinichev V.N., Bobkov S.P., Piskunov A.V. The method of calculating air flow in a centrifugal impact mill [Metodika rascheta raskhoda vozdukh v tsentrobezhno-udarnoy mel'nitse]. University News. Chemistry and Chem. technology. 1982. No. 2. Pp. 230–232. (rus)

5. Danilov R.G. The hypothesis of the mechanism of fine grinding in rotary mills with gear-like gearing [Gipoteza mekhanizma tonkogo izmel'cheniya v rotnykh mel'nitsakh s zubchatopodobnym zatsepleniym]. Energo - i resursosberezheniye v usloviyakh rynochnykh otnosheniy: Sb. dokl. Mezhdunar. konf. Ch.4. Belgorod, 1997. Pp. 164–168. (rus)

6. Semikopenko I.A., Borozdin E.A., Vavilov D.V. Centrifugal disc grinder. Patent RF, no 2687193, 2019.

7. Bogorodsky A.V., Blinichev V.N., Lapshin V.B. Intensification of the grinding process in a mill of a disintegrator type [Intensifikatsiya protsessa izmel'cheniya v mel'nitse dezintegratornogo tipa]. Proceedings of the universities of the USSR. Chemistry and Chem. technology. 1980. Vol. 23. No. 5. Pp. 643–645. (rus)

8. Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. Elements of Applied Mathematics. [Elementy prikladnoy matematiki]. Science 3rd ed. 1972. 410 p. (rus)

9. Kirkach N.F., Balasanyan R.A. Calculation and design of machine parts. [Raschot i proyektiro-

vaniye detaley mashin]. Textbook for tech. universities. 3rd ed. Publishing House "Basis". 1991. 276 p. (rus)

10. Arzamasov B.N., Sidorin I.I., Kosolapov G.F. Material science: a textbook for higher educational institutions. [Materialovedeniye: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh-tehnicheskikh zavedeniy]. 2nd ed. Engineering. 1986. 384 p. (rus)

11. Bauman V.A., Klushantsev B.V., Martynov V.D. Mechanical equipment of enterprises of building materials, products and structures. 2nd ed. Engineering. 1981. 320 p. (rus)

12. Blinichev V.N., Klochkov N.V. Modern designs of machines and apparatuses of chemical industries (mixers, mixers, dispersants, mills) [Mekhanicheskoye oborudovaniye predpriyatiy stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy]. Textbook on the lecture course MAHP. IHTI. 1980. 83 p. (rus)

13. Khodakov G.S. Fine grinding of building materials. [Tonkoye izmel'cheniye stroitel'nykh materialov]. Construction. 197. 230 p. (rus)

14. Anuryev V.I. Handbook of a designer-machine builder: in 3 vols. [Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: v 3 t.]. Vol. 1. 5th ed. Engineering. 1978. 736 p. (rus)

15. Eremin N.F. Processes and devices in the technology of building materials. [Protsessy i apparaty v tekhnologii stroitel'nykh materialov]. Higher. school. 1986. 280 p. (rus)

Information about the authors

Semikopenko, Igor A. PhD, Assistant professor. E-mail: semikopenko.i@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46.

Voronov, Vitaly P. DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46.

Belyaev, Denis A. Research assistant. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46.

Borozdin, Egor A. Research assistant. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st.Kostyukova, 46.

Received 09.11.2019

Для цитирования:

Семикопенко И.А., Воронов В.П., Беляев Д.А., Бороздин Е.А. Теоретическое исследование процесса измельчения материала в рабочей камере дисковой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131

For citation:

Semikopenko I.A., Voronov V.P., Belyaev D.A., Borozdin E.A. Theoretical study of the material grinding process in the working chamber of a disk mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 125–131. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-125-131

Научное издание
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова»
№ 11, 2020 г.

Научно-теоретический журнал

Координатор журнала
Алфимова Наталия Ивановна

Редактор журнала
Агеева Марина Сергеевна

Компьютерная верстка
Яшкина Светлана Юрьевна

Перевод на английский язык
Колесник Оксана Юрьевна

Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации ПИ №ФС 77-26533 от 07.12.2006

Подписано в печать 30.11.20. Формат 60×84/8
Усл. печ. л. 15,23. Уч.-изд. л. 16,38
Тираж 40 экз. Заказ 158. Цена договорная.
Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: г. Белгород, ул. Костюкова, 46, оф. 724/4 Гк.
Номер сверстан в редакции научно-теоретического журнала
«Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова».
Отпечатано в РИЦ БГТУ им. В.Г. Шухова