

На правах рукописи



ИСАКУЛОВ БАИЗАК РАЗАКОВИЧ

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АРБОЛИТОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ И СЕРОСОДЕРЖАЩИХ
ВЯЖУЩИХ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иваново 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет».

Научный консультант

советник РААСН, доктор технических наук, профессор,

Акулова Марина Владимировна

Официальные оппоненты

Соколова Юлия Андреевна,

академик РААСН, доктор технических наук, профессор, ректор НОУ ВО «ИНЭП»

Логанина Валентина Ивановна,

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Соков Виктор Николаевич,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы» НИУ «Московский государственный строительный университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», г. Волгоград

Защита состоится 22 января 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета www.ivgpu.com

Автореферат разослан « » декабря 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Н.В. Заянчук

Н.В. Заянчукская

Актуальность темы исследования. В связи с расширением жилищного строительства в странах Центральной Азии с каждым днем возрастает потребность в строительных материалах, поэтому создание конструкционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов с применением вторичных ресурсов является актуальным. Использование эффективных легких бетонов в строительстве позволяет, с одной стороны, снизить массу конструкции здания на 35 %, расход цемента – на 20 %, трудозатраты на 20 %, с другой стороны, повысить теплотехнические и эксплуатационные свойства конструкций, их долговечность и коррозионную стойкость, сопротивляемость динамическим, сейсмическим воздействиям и резким температурным перепадам.

Наибольшее распространение в регионах с жарким климатом получает арболитобетон, который сочетает в себе легкость, экологичность, высокие теплоизоляционные качества и может содержать в своем составе растительные отходы сельского хозяйства, которыми богаты степные районы. В Центральноазиатском регионе имеются также сырьевые ресурсы в виде многотоннажных отходов металлургической, нефтехимической, горнодобывающей и топливно-энергетической промышленности.

Широкая область применения арболитов, характеризующихся низкой плотностью (600–650 кг/м³) и довольно высокой прочностью (3,0–6,0 МПа) при минимальном расходе сырьевых материалов, обусловлена целым рядом их положительных качеств. Это один из самых легких строительных материалов, обладающий низкой теплопроводностью (0,7–0,19 Вт/мК) и хорошей звукоизоляционной способностью. Благодаря способности поддерживать нормальный микроклимат в помещении, исключая образование конденсата на поверхности ограждающих конструкций, арболит является одним из лучших стеновых материалов.

Однако возросшие требования к качеству арболита ставят задачу по дальнейшему повышению его конструктивно-эксплуатационных, технологических и прочностных показателей. Использование отходов промышленности в качестве шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, обладающих высокой активностью и приводящих к возникновению структурообразующих элементов, должно привести к повышению прочностных и деформативных характеристик, долговечности и биостойкости арболита.

Известно, что добавка технической серы в виде порошка влияет на прочность бетона. Однако при этом не выявлен механизм влияния добавки на структуру и свойства цементных композитов, не определены рациональные составы, способы подготовки и производства арболитобетонов. Это свидетельствует о целесообразности исследования возможности получения высокоэффективных строительных материалов на основе арболита, разработки технологий их производства и внедрения.

Данное диссертационное исследование выполнено в соответствии с Законом Республики Казахстан № 259-V ЗРК «О республиканском бюджете на 2015–2017 годы» от 28.11.2014 г., Законом Республики Казахстан № 407-IV ЗРК «О науке» от 18.02.2011 г., Постановлением Правительства Республики Казахстан № 1300 «О реализации Закона Республики Казахстан “О республиканском бюджете на 2015–2017 годы”» от 11.12.2014 года, Постановлением Правительства Республики Казахстан № 575 «Об утверждении Правил базового, грантового, программно-целевого финансирования научной и (или) научно-технической деятельности» от 25.05.2011 года, решением Национального научного совета о грантовом финансировании «Рациональное использование природных ресурсов, переработка сырья и продукции» (протокол № 2 от 23.01.2015 года), приказом Председателя Комитета науки № 8-нж от 02.02.2015 года.

Степень разработанности темы исследования. При выполнении диссертационной работы был проведен научно-технический обзор литературы по технологии получения арболитов, режимам механоактивации его компонентов, видам минеральных и пластифици-

цирующих добавок на основе шлакощелочных и серосодержащих отходов, используемых в составах арболитобетонов.

Теоретическими основами диссертации стали исследования отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросам структурообразования, технологиям получения и оптимизации составов арболитобетонных материалов, способам модифицирования дисперсных вяжущих систем и бетонов с различными минеральными пластифицирующими добавками и изучению их свойств. На развитие науки и технологии в производстве арболитобетонов огромное влияние оказали фундаментальные труды П.П.Будникова, А.Т. Баранова, П.И. Боженова, А.В. Волженского, Ю.М. Бутта, Х.С.Воробьева, Е.А.Галибиной, В.Д. Глуховского, С.В. Федосова, К.Э. Горяйнова, Ю.П. Горлова, Л.А. Малининой, Е.Н. Малинского, А.П. Меркина, Г.П. Сахарова, К.Д. Некрасова, Г.В. Румына, Ю.М. Баженова, М.В. Балахнина, А.А. Безверхия, И.С. Бобыка, А.А. Акчабаева, Г.А. Батырбаева, Г.А. Бужевича, Г.Е. Евсеева, И.К. Касимова, М.И. Клименко, И.П. Мещерякова, А.И. Минаса, И.А. Рыбьева, Р.Б. Сироткина, В.И. Савина, И.Х. Наназашвили, А.С. Щербакова, А.А. Тулаганова, В.М.Хрулева, Ю.С. Бутова, Б.Н. Виноградова, А.Е. Галибина, Г.И. Горчакова, Г.Д. Диброва, В.Г. Довжика, И.А. Иванова, В.Х. Кикаса, В.К. Козлова, В.М. Медведева, В.А. Мелентьева, В.Ф. Мигачева, В.Г. Пантелеева, Н.А. Попова, В.И. Романова, В.Н. Россовского, Ю.А. Соколовой, А.М. Сергеева, Т.Е. Сергеева, Г.Н. Сиверцева, В.Н. Сокова, Н.Я. Спивака, В.В. Стольникова, В.Б. Судакова, Н.И. Федьнина, М.Ф. Чебукова, В.И. Логаниной, Г.П. Чеблыкина, К.А. Бисенова и др. Благодаря этим исследованиям в производстве арболитобетонов широко используются отходы промышленности и сельского хозяйства растительного происхождения.

Анализ мирового опыта свидетельствует о том, что большие возможности для строительной отрасли открываются с применением цементов и бетонов из минеральных вторичных материалов промышленности и органических растительных отходов. Эти вещества обладают рядом физико-механических и технико-эксплуатационных характеристик, значительно превышающих аналогичные свойства многих других минеральных вяжущих и композитов на их основе.

В нашем исследовании использованы теоретические и методологические наработки предшественников, но внимание акцентировано на нерешенных проблемах повышения качества арболита с использованием различных отходов промышленности и сельского хозяйства.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, разработка научных основ формирования их структуры, состава и свойств при использовании в качестве органического заполнителя стеблей травянистых растений.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработка теоретических принципов и научных основ получения высокопрочных легких арболитобетонов на основе шлакощелочных вяжущих и серосодержащих отходов нефтехимической промышленности.
2. Исследование возможности получения шлакощелочных вяжущих составов с добавкой высококальциевой золы-уноса повышенной адгезионной способности к органическим волокнистым компонентам арболитобетона.
3. Исследование совместного влияния органических и неорганических компонентов шлакощелочного арболита на формирование его микроструктуры и прочностных характеристик, и разработка состава шлакощелочного вяжущего.
4. Разработка составов и исследование свойств шлакощелочного арболитобетона с использованием стеблей хлопчатника.
5. Исследование термодинамическими расчетами и экспериментальными методами

влияния добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства композиционных вяжущих для получения теплоизоляционно-конструкционных арболитобетонов повышенной прочности.

6. Разработка составов и исследование влияния их основных компонентов на физико-механические свойства серосодержащего арболита с использованием стеблей тростника.

7. Исследование механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита в зависимости от вида и способа нагружения, анализ использования арболита в строительных конструкциях.

8. Технично-экономическая оценка технологий производства шлакощелочного и серосодержащего арболитов на основе стеблей тростника и хлопчатника при изготовлении стеновых блоков, облицовочных плит.

Научная новизна исследования. Основные результаты, полученные автором и составляющие научную новизну диссертации, заключаются в следующем.

С помощью системного анализа и теоретических подходов разработаны принципы и научные основы получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, методологически обоснована целесообразность комплексного регионального использования промышленных и сельскохозяйственных отходов;

Выявлены закономерности получения шлакощелочных вяжущих с добавкой высококальциевой золы-уноса повышенной адгезионной способности к органическим волокнистым материалам арболитобетона. Найдено, что их фазовый состав определяется видом щелочного компонента и добавки.

Установлена возможность регулирования свойств вяжущих одинаковых марок путем варьирования соотношения состава вяжущего и изменения соотношения факторов.

Получены зависимости, описывающие скорость набора прочности шлакощелочных арболитовых композиций в процессе твердения.

Установлены закономерности комплексного влияния органических и неорганических компонентов шлакощелочного арболита на формирование его микроструктуры и прочностных характеристик.

Разработаны экспериментально-оптимальные составы шлакощелочного арболитобетона, получены диаграммы графической интерпретации результатов многофакторных экспериментальных исследований, позволяющие оптимизировать составы вяжущих растворов и органических заполнителей на основе стеблей хлопчатника в широких пределах.

Установлено влияние добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства композиционных вяжущих для получения теплоизоляционно-конструкционных арболитобетонов повышенной прочности.

Выявлено, что обработка целлюлозных материалов серосодержащими растворами вследствие эффекта «дубления» приводит к улучшению как прочностных свойств органического компонента, так и стойкости целлюлозы к биокоррозии.

Термодинамическими расчетами и экспериментами показано, что соединения железа (VI) в виде феррата натрия Na_2FeO_4 химически разрушают сахарацы целлюлозы, что ведет к увеличению адгезии между органическими и неорганическими компонентами арболитобетонов.

Предложено с помощью метода трехфакторного эксперимента планировать расход стеблей тростника и серосодержащих вяжущих компонентов для теплоизоляционно-конструкционного арболита.

Разработаны составы и выявлен характер влияния основных составляющих компонентов на физико-механические свойства серосодержащего арболита с использованием

тростника.

Установлены закономерности влияния механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита в зависимости от вида и способа нагружения при использовании его в строительных конструкциях.

Экспериментально доказано, что в нагруженном состоянии органический наполнитель серосодержащего арболита оказывает большое сопротивление деформациям, упрочняется и может воспринимать увеличенную нагрузку по сравнению с ненапряженным состоянием.

Найдено, что упрочнение органического наполнителя в изучаемом диапазоне напряжений до $0,8 R_3$ (кубиковая прочность органического наполнителя) происходит за счет уменьшения внутриволокнистой (для тростника камыша) пористости и возникновения эффекта «обоймы».

Выявлено, что наименьшей пористостью и, как следствие, наиболее высокими прочностными показателями обладают составы, содержащие комплексные добавки с технической серой Жанажолского месторождения и пиритным огарком Алгинского химкомбината «Фосфохим».

Разработана методика анализа кривых деформирования серосодержащих арболитовых материалов при сжатии, позволяющая определять точки «критических» состояний композита в процессе нагружения.

Экспериментально доказано, что при нагружении серосодержащего арболита плотного строения происходит не одновременное, а последовательное разрушение растворной составляющей и органического наполнителя во второй фазе твердения. В первой фазе твердения происходит разрушение материала только по растворной составляющей.

Установлено, что прочность серосодержащего арболита пористого строения формируется в одну фазу, разрушение происходит одноступенчатое – по кольматированному органическому наполнителю. Характер разрушения образцов из серосодержащего арболита в различном возрасте наглядно иллюстрируют высказанные дополнения к гипотезам формирования прочности серосодержащего арболита и механизма его разрушения.

Теоретическая и практическая значимость работы исследования. В диссертации изложены научнообоснованные технические и технологические решения получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, позволяющие их использовать в качестве стенового материала зданий промышленно-гражданского назначения. Теоретическая значимость работы состоит в использовании фундаментальных научных исследований в области структурообразования модифицированных композиционных арболитобетонов на основе шлакощелочных вяжущих и отходов нефтехимической промышленности. Технология позволяет использовать композиционные активированные вяжущие в производстве легких бетонов, интенсифицировать твердение шлакощелочных и серосодержащих арболитовых составов, а также повысить их прочность на 50–70 % при умеренном расходе цемента, что способствует организации безотходного производства. Предложена классификация сырьевых материалов для производства арболитобетонов. При ее разработке использованы термодинамические и экспериментальные методы изучения взаимной механохимической, окислительно-восстановительной активации и детоксикации серосодержащих отходов совместно с другими твердыми промышленными отходами: пиритными огарками и отсевами мелких фракций бурого угля.

Разработаны новые закономерности изменения механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита и оптимизированы составы позволяющие, получать, арболитовые композиты с пределом прочности при сжатии 1,9–2,5 МПа, водоудерживающей способностью 98–99%, адгезионной прочностью 45,7–59,7 МПа, водопоглощением по массе 5,9–9,2 %.

Разработаны технологические схемы производства арболита на основе композицион-

ных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, проекты стандартов «Измельченные стебли тростника для арболита», «Арболит на измельченных стеблях хлопчатника и изделия из него», а также республиканские строительные нормы «Указания по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита на измельченных стеблях хлопчатника», утвержденные Госстроем Узбекистана и Казахстана (акты внедрения № 3 от 18.07.2012 г., № 9 от 17.08.2012 г., № 12 от 10.09.2012, № 27 от 15.06.2013 г., № 1 от 10.10.2014 г., № 2 от 18.08.2014 г., № 3 от 15.07.2011 г.).

На базе Актюбинского завода железобетонных изделий выпущена опытно-промышленная партия теплоизоляционного шлакощелочного арболита. Экономический эффект от внедрения составил 577400 руб. в год (2011 г.).

На производственном участке ТОО «Региональный индустриальный технопарк Актюбе» выпущена опытная партия стеновых серосодержащих арболитовых блоков. Суммарный экономический эффект от внедрения составил 425040 руб. в год (2011 г.).

Разработаны технологии по производству арболита на основе шлакощелочных и серосодержащих вяжущих и отходов из травянистых растений, учитывающие особенности новых композиционных вяжущих и органического заполнителя и позволяющие по сравнению с традиционными технологиями производства арболита сократить:

- для шлакощелочного арболита в 1,7–1,9 раза сократить время и энергозатраты при приготовлении арболитовой смеси, в 2–2,5 раза – время укладки и уплотнения смеси, в 7–8 раз – длительность цикла твердения изделий, в 1,8–2,5 раза – удельную металлоемкость производства;

- для серосодержащего арболита отличительной особенностью по сравнению с известной технологией является наличие поста механохимической активации и детоксикации серосодержащих вяжущих, мерсеризация целлюлозного органического заполнителя, а также операционные работы с добавками хлорида кальция и бария. Выбранная технология позволяет в 1,6–1,8 раз сократить время и энергозатраты при приготовлении арболитовой смеси, в 2–2,5 раза время укладки и уплотнения смеси, в 2–2,5 раза – удельную металлоемкость производства, длительность твердения – в 6–7 раз.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой диссертационного исследования послужили современные положения теории и практики создания, разработки высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих. При проведении научных исследований использовались стандартные средства измерений и методы анализа физико-механических характеристик арболитовых композитов, полученных с применением современного методов рентгенофазового, дифференциально-термического, микроскопического анализа и испытательного оборудования.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой диссертационного исследования послужили современные положения теории и практики создания, разработки высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих.

При проведении научных исследований использовались стандартные средства измерений и методы анализа физико-механических характеристик арболитовых композитов, полученных с применением современного испытательного оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

- методологические принципы и научные основы получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих;

- выявленные закономерности получения шлакощелочных вяжущих составов с добавкой высококальциевой золы-уноса повышенной адгезионной способности к органическим материалам арболитобетона и определение их фазового состава в зависимости от вида ще-

лочного компонента и добавки;

- закономерности комплексного влияния органических и неорганических компонентов шлакощелочного арболита на формирование его микроструктуры и прочностных характеристик;

- принципы оптимизации составов на основе вяжущих и органических заполнителей из стеблей хлопчатника, позволяющие выбирать нужные составы шлакощелочного арболита по технологическим и технико-экономическим соображениям;

- закономерности влияния добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства композиционных вяжущих для получения теплоизоляционно-конструкционных арболитобетонных повышенной прочности;

- исследованные процессы, происходящие при обработке целлюлозных материалов серосодержащими растворами, приводящие к улучшению как прочностных свойств органического компонента, так и стойкости целлюлозы к биокоррозии;

- выявленные данные термодинамических расчетов и экспериментальных методов, показывающие, что соединения железа (VI) в виде феррата натрия Na_2FeO_4 химически разрушают сахарацы целлюлозы, что ведет к увеличению адгезии между органическими и неорганическими компонентами арболитобетонных;

- разработанные составы и характер влияния составляющих компонентов на физико-механические свойства серосодержащего арболита с использованием тростника;

- установленные закономерности влияния механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита плотного и пористого строения в зависимости от вида и способа нагружения;

- результаты производственных испытаний и внедрения, разработанных шлакощелочных и серосодержащих арболитов на основе стеблей тростника и хлопчатника при изготовлении стеновых блоков, облицовочных плит.

Достоверность результатов диссертационного исследования и выводов по работе подтверждена сходимостью большого числа экспериментальных данных, полученных с применением комплекса стандартных и высокоинформативных методов исследования, их непротиворечивостью известным закономерностям. Выводы и рекомендации работы получили положительную апробацию и внедрены в строительную практику. Результаты исследования нашли практическое применение на Актюбинских предприятиях по выпуску строительных материалов ТОО «ЖБИ-25», ТОО «Региональный индустриальный технопарк Актобе», ТОО «Стройдеталь» (Казахстан) и на Нукусском заводе железобетонных изделий (Узбекистан). Теоретические положения диссертационной работы, а также результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе Актюбинского регионального государственного университета при подготовке бакалавров и магистров по профилям «Промышленное и гражданское строительство».

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы автора докладывались и обсуждались: на XXII научно-технической конференции Каракалпакского государственного университета (Нукус, 1999); VI международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» (Иваново, 1999); 25-th Conference on our world in concrete structures (Singapore, 2000); научно-практической конференции Актюбинского филиала Казахской академии транспорта и коммуникации (Актобе, 2005); международной научно-практической конференции «Образование и наука – созданию конкурентоспособного Казахстана» (Актобе, 2007); международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию юбилею Актюбинского университета «Дуние» (Актобе, 2007); XVIII научно-технической конференции Ташкентского архитектурно-строительного института (Ташкент, 2009); VI международной научно-практической

конференции «Итоги строительной науки» (Владимир, 2010); международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: техника, технологии и образование» (Актобе, 2010); Light concrete on the base of industrial and agricultural. Second international Conference on Sustainable Construction Material and Technologies, (Ancona, Italy, 2010); II всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии в промышленности, науке и образовании» (Оренбург, 2010 г.); международной научно-практической конференции «Инновации и образовательные технологии» (Актобе, 2011); международной научно-практической конференции «Надиоровские чтения – 2011» (Алматы, 2011); VII международной научно-практической конференции Zpravuvdeckeideje – 2011 (Praha, 2011); VIII международной научно-практической конференции «Найновите научни постижения – 2012» (София, 2012); VIII международной научно-практической конференции Naukowa przestrzen Europy – 2012 (Przemysl, 2012); международной научно-практической конференции «Информационная среда вуза» (Иваново, 2012); международной научно-практической конференции «Новейшие достижения науки – 2013» (София, 2013); международной научно-практической конференции «Дни науки – 2013» (Прага, 2013); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (Благовещенск, 2014); XVIII международного научно-практического форума «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEXT-2015) (Иваново, 2015).

Личный вклад автора состоит в разработке теоретических принципов, научных основ и составов высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, обобщении и анализе результатов исследований.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано семьдесят семь научных статей общим объемом 53,67 печ. л., авторские – 30,6 печ. л., из них девятьна-дцать статей общим объемом 6,4 печ. л. – в рецензируемых научных журналах и изданиях, в том числе авторские – 3,2 печ. л., получено два инновационных патента РФ и РК, опубликовано 2 монографии.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 307 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 73 таблиц. Список использованной литературы включает 320 наименований.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» в соответствии с паспортом специальности 05.23.05 – «Строительные материалы и изделия» и, в частности, с формулой специальности «Строительные материалы и изделия» – областью науки и техники, занимающейся разработкой научных основ получения строительных материалов различного назначения и природы, включая выбор сырья, проектирование состава, управление физико-химическими процессами структурообразования и технологией, обеспечивающими высокие эксплуатационные свойства изделий и конструкций при механическом нагружении и воздействии окружающей среды, пунктами области исследования: п. 1. Разработка теоретических основ получения различных строительных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств; п. 2. Создание новых строительных материалов, обеспечивающих строительство быстровозводимых трансформируемых и долговечных зданий и сооружений; п. 6. Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов; п. 7. Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности.

Автор выражает глубокую благодарность за оказанную помощь и научные консультации по диссертационной работе:

- акад. РААСН, д-ру техн. наук, профессору, зав.каф. «Техногенная безопасность», президенту ИВГПУС В. Федосову;

- д-ру техн. наук, профессору кафедры «Нанотехнология и новые материалы» ЕНУ им. Л.Гумилева, А.М. Сарсенову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы, цель и задачи исследований, сформулированы рабочая гипотеза, научная новизна и практическая значимость работы, и ее структура.

В первой главе проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов, дан анализ современного состояния использования отходов промышленности и сельского хозяйства в производстве строительных материалов стран СНГ и за рубежом. Показаны виды арболитов и факторы, влияющие на их физические, физико-механические и физико-химические свойства, и способы изменения свойств арболитобетонов.

Во второй главе проведены исследования по определению возможности создания шлокощелочных вяжущих составов с добавкой высококальциевой золы-уноса.

В работе рассмотрены основные физико-химические процессы взаимодействия компонентов, и фазовый состав образующихся при этом продуктов. Найдено, что активность и скорость набора прочности в безобжиговых щелочных композициях поддаются регулированию за счет изменения основности алюмосиликатного и щелочного компонента, а также за счет введения добавок.

При изучении композиции на основе золы-уноса, электротермофосфорного шлака, досульфатной смеси и активной добавки исследования образцов проводились после тепловой, тепловлажностной обработки, а также в естественных условиях. Установлено, что продуктами взаимодействия в изучаемой системе наряду с низкоосновными гидросиликатами кальция служат кальцит и щелочные алюмосиликаты, что подтверждают данные рентгенографического анализа (рис. 1, кр. 2).

Найдено, что структура кристаллических новообразований в исследуемой композиции несовершенна, что, вероятно, связано с ее невысокой активностью.

Поэтому были проведены исследования по добавлению в шлакощелочную смесь диоксида натрия. Согласно рентгенограмме (рис. 1), в составе продуктов гидратации вяжущего с добавкой золы-уноса и диоксида натрия, наряду с линиями этtringита и кальцита фиксируются линии кристаллических новообразований, указывающие на высокосульфатную форму гидросульфогеррита кальция.

Результаты термографического анализа также подтверждают данные рентгенограмм. Так, эндотермические эффекты при температуре 413 К соответствуют удалению гидратной и цеолитной воды, а эндотермические эффекты при 823 и 973 К - полиморфным превращениям, экзотермический эффект при 1063 К отражает кристаллизацию волластонита и кристоболита (рис. 2.).

Таким образом, экспериментальные данные исследований продуктов, взаимодействия вяжущих композиций с добавкой золы-уноса показали, что их фазовый состав определяется видом щелочного компонента и добавки. При изучении влияния плотности щелочного компонента на прочность камня вяжущего использовали жидкое стекло с разными силикатными модулями (M_c).

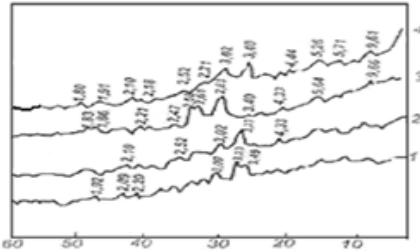


Рис 1. Рентгенограмма:

- 1 – исходной золы-уноса; 2 – гидратированного вяжущего на основе электротермофосфорного шлака и золы-уноса с использованием содосульфатной смеси, твердевшего в нормальных условиях; 3 – гидратированного вяжущего на основе золы-уноса и диоксида натрия; 4 – на основе электротермофосфорного шлака и золы-уноса с использованием содосульфатной смеси, после тепловой обработки

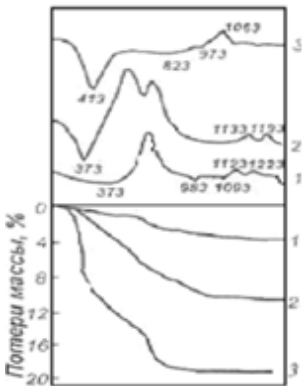


Рис. 2. Термограммы:

- 1 – исходной золы-уноса; 2 – гидратированного вяжущего на основе электротермофосфорного шлака и золы-уноса с использованием содосульфатной смеси, твердевшего в нормальных условиях; 3 – гидратированного вяжущего на основе золы-уноса и диоксида натрия

Установлено, что увеличение плотности раствора щелочного компонента и его концентрации приводит к увеличению прочности камня вяжущего. Так увеличение плотности раствора щелочного компонента с 1100 до 1300 кг/см³ приводит к повышению прочности камня вяжущего в 1,7 – 2 раза и в зависимости от модуля стекла $M_c - 1$ из составляет 30,7; 45,9 МПа, соответственно. Для изучения влияния соотношения комплексных щелочных компонентов на прочность и сроки схватывания шлакощелочного вяжущего использовалась содосульфатная смесь в виде водного раствора с плотностью 1200 кг/м³, которую добавляли в жидкое стекло с $M_c - 3$. Введение в качестве добавки содосульфатной смеси значительно углубляет гидратацию шлакового стекла, а также способствует образованию волокнистых гидросульфалоуминатов кальция, выполняющих роль дополнительной арматуры и уплотняющих структуру цементного камня. Увеличение количества

содосульфатной смеси в составе щелочного компонента до 75% по объему, приводит к повышению прочности камня вяжущего от 45,9 до 47,7 МПа.

Для управления процессом структурообразования щелочных вяжущих изучалась возможность регулирования их прочностных характеристик с помощью варьирования фракционного состава золы. Найдено, что прочность щелочного вяжущего с добавкой золы – уноса зависит от ее дисперсности (табл. 1). Приведенные данные показывают, что наибольший предел прочности при сжатии достигается при использовании мелкой фракции золы, содержащей в основном стекловидную фазу оксида кремния. В работе также изучалось влияние электротермофосфорного шлака на прочностные характеристики шлакощелочного камня вяжущего. Как показали результаты испытаний, с увеличением содержания электротермофосфорного шлака до 42 % увеличивается предел прочности при сжатии вяжущего. Это может объясняться тем, что гранулированный электротермофосфорный шлак дает основное количество гидратируемых компонентов, придающих образцам прочность. Эксперименты показали, что золощелочные вяжущие являются

быстрохватывающимися, начало схватывания насту-

пает через 1 ч 45 мин, а конец – через 6 ч. Полученные результаты исследования позволяет регулировать марку вяжущего в широком диапазоне для марку вяжущего в широком диапазоне для получения шлакощелочных арболитов требуемого качества.

Таблица 1

Влияние дисперсности золы – уноса на прочность камня вяжущего

Удельная поверхность золы – уноса, м ² /кг	Затворитель	Предел прочности при сжатии, МПа
300	Жидкое стекло	45,2
350	Жидкое стекло	45,1
400	Жидкое стекло	41,5
410	Жидкое стекло	40,3
300	Содосульфатная смесь + жидкое стекло	47,7
350	Содосульфатная смесь + жидкое стекло	45,5
400	Содосульфатная смесь + жидкое стекло	42,0
410	Содосульфатная смесь + жидкое стекло	40,6

Оптимальным соотношением вяжущей композиции на основе электротермофосфорного шлака, золы – уноса и щелочного компонента, состоящего из жидкого стекла и водного раствора содосульфатной смеси является, по массе: шлак 42%; жидкое стекло и содосульфатная смесь 8%; зола-унос 50%.

В третьей главе приведены результаты совместного влияния органических и неорганических компонентов на формирование микроструктуры и прочностные характеристики шлакощелочного арболита. Проведена оптимизация составов шлакощелочного арболита с помощью методов математического планирования эксперимента. Исследования кинетики процесса структурообразования шлакощелочного арболита при температуре 10-80°С осуществлялись с помощью метода акустического интерферометра и импульсным ультразвуковым методом. Анализ полученных данных показывает, что введенный в шлакощелочное вяжущее органический наполнитель, занимающий до 70% его объема, существенно влияет на характер формирования его структуры (рис. 3). Так при введении пористого наполнителя растворная часть арболита адсорбируется на его поверхности, система становится жесткой, изменяется упругость, периоды структурообразования смеси на ранних стадиях твердения отличаются по продолжительности от периодов формирования структуры шлакощелочного вяжущего без наполнителей. Первая стадия формирования структуры (участки 1-3) шлакощелочного арболитобетона составляет 25 мин, что на 15 мин меньше, чем первая стадия образования коагуляционной структуры чистой шлакощелочной дисперсии (рис. 3).

Скорее всего, пикообразный характер кривой (интервал 1-3) объясняется началом образования коллоидной структуры. По измерению резонансной частоты установлено, что момент ее максимального значения в интервале 1-3 соответствует максимальному значению показателя фазовой скорости. Уменьшение значений фазовой скорости и резонансной частоты в интервале 2-3 свидетельствует о том, что в результате внутримолекулярного агрегирования и поликонденсации новообразований высвобождается часть связанной воды и шлакощелочная дисперсия разжижается. После затворения смесей щелочным раствором в зоне контакта «арболит - шлакощелочной раствор» протекают физико-химические процессы. Отсасывание влаги органическим наполнителем сразу после приготовления смеси приводит к усилению адгезионных контактов между шлакощелочным вяжущим и шероховатыми поверхностями измельченных стеблей растений. Так же происходит нарастание предела прочности вяжущего камня арболита при сжатии во времени от суточного - 7,8 МПа до 19 МПа через 3сут. и 28 МПа через 7 сут. В период образования пространственного каркаса кри-

сталлизационной структуры вяжущего в составе арболита упрочняется система «вяжущее – наполнитель», о чем свидетельствует рост значений скорости ультразвука



Рис. 3. Кинетика структурообразования шлакощелочного вяжущего:
v - фазовая скорость, км/с;
f_p - резонансная частота, Гц;
v, - скорость ультразвука, км/с;
t - длительность фронта, мкс;
R - предел прочности арболита при сжатии, МПа

Это обуславливает повышение общей прочности, и монолитности арболитобетона улучшение совместной работы отдельных структурных составляющих шлакощелочных арболитов под действием разрушающих усилий, приводящее к сближению прочностных и деформативных свойств органического заполнителя и растворной части.

Для исследования влияния свойств органического заполнителя на физико-механические характеристики шлакощелочного арболита использовался стебли хлопчатника влажностью 8 - 9 % по массе, хранившиеся на открытом воздухе, которые подвергался измельчению и рассеву на ситах с размерами отверстий 10мм, 15мм, 20мм, 28мм, 35мм при расстояний между отверстиями 5-10мм. Найдено, что наиболее оптимальными являются фракции 15-18 и 20 мм.

Одна из специфических особенностей органического заполнителя – это наличие в последнем легкогидролизующих и экстрактивных веществ так называемых – «цементных ядов», которые резко замедляют схватывание и набор прочности цементного камня, сильно снижают прочность растворной части арболита. Общее количество водозэкстрактивных веществ из стеблей хлопчатника составляет 2-3 масс.%. В работе изучалась кинетика нарастания прочности арболита различного состава, затворенного в водной вытяжке из стеблей хлопчатника, что дало возможность определить минералы шлакощелочного вяжущего, способные гидратироваться в составе арболита (табл. 2).

Таблица 2

Нарастание прочности шлакощелочного арболита, затворенного в водной вытяжке из стеблей хлопчатника

Наименование вяжущего	Предел прочности при сжатии, МПа, через сут.					
	1	2	3	4	5	6
1. Зола-унос+щелочной компонент+стебли хлопчатника	0,57	0,65	0,9	1,2	1,9	2,3
2. Электротермофосфорный шлак+щелочной компонент+стебли хлопчатника	0,62	0,67	0,95	1,27	2,0	2,4

Найдено, что шлакощелочной арболит способен гидратироваться при введении его состав добавок, нейтрализующих водорастворимые вещества хлопчатника, и ускорителя твердения. Расход нейтрализующих добавок зависит от удельной поверхности заполнителя и количества сахара, содержащегося на поверхности измельченных стеблей хлопчатника, а расход ускорителей твердения зависит от количества шлакощелочных вяжущих и расхода нейтрализующих добавок. Результаты показали, что при увеличении количества щелочного раствора удобоукладываемость арболитовой смеси улучшается, однако его повышенной расход приводит к снижению прочности, повышению плотности арболита.

Подбор состава шлакощелочного арболита проводился с помощью метода математического планирования эксперимента (табл. 3). Щелочной раствор состоял в соотношении по объему один к одному: из растворимого жидкого стекла плотностью – 1300 кг/м³ и водного раствора содосульфатной смеси плотностью – 1200 кг/м³.

Таблица 3

Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Шаг варьирования	Обозначения
Натуральный	Кодированный	Нижний	Основной	Верхний		
ЗУ	X1	200	250	300	50	Z1
СХ	X2	90	120	150	30	Z2
ЩР	X3	200	250	300	50	Z3

где на 1 м³: ЗУ- зола-унос, кг-Х1; СХ- стебли хлопчатника, кг -Х2; ЩР- щелочной раствор, л -Х3.

Полученные уравнения регрессии:

$$Y = 5,81 + 1,593 X1 + 0,74 X2 + 0,493 X1 X2 + 0,993 X1 X3 + 0,218 X1 X2 X3. \quad (1)$$

Поставив в уравнение натуральные значения, получим уравнение:

$$Y = 21,539 - 0,01987 Z1 - 0,03279 Z2 - 0,0674 Z3 - 0,0003964 Z1 Z2 + 0,0000492 Z1 Z3 - 0,0000984 Z2 Z3 + 0,0000029 Z1 Z2 Z3. \quad (2)$$

Как показали исследования зависимость предела прочности при сжатии арболита от расхода золы - уноса носит линейный характер. Причем область оптимальных значений расхода золы уноса, определяющих достижение максимальной прочности коррелируется с оптимальным расходом щелочного компонента.

Анализ зависимостей показал (рис. 4, 5, 6), что требуемую прочность шлакощелочно-гоарболита на стеблях хлопчатника плотностью 550 кг/м³ можно получить при регулировании переменных факторов в широких пределах. Варьируя расход стеблей хлопчатника и щелочного компонента, можно уменьшить расход золы – уноса. Как показывают приведенные данные использование шлакощелочного вяжущего позволяет получить теплоизоляционно-конструкционный арболит с пределом прочности при сжатии до 1,8 – 2,5 МПа. Технология арболита из хлопчатника в основном включает те же операции, что и технология арболита на древесном сырье.

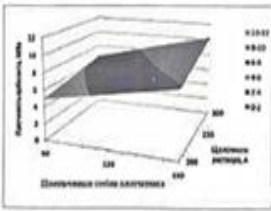


Рис. 4. Влияние расхода измельченных стеблей хлопчатника и щелочного компонента на прочность арболита

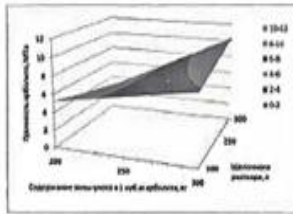


Рис. 5. Влияние расхода золы – уноса и щелочного компонента на прочность арболита

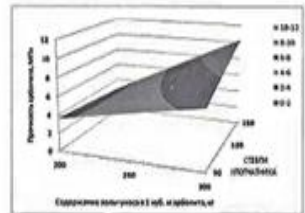


Рис. 6. Влияние расхода золы – уноса и измельченных стеблей хлопчатника на прочность арболита

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства серосодержащих вяжущих для получения конструкционных арболитобетонов. Серосодержащее вяжущее включало портландцемент и серосодержащие добав-

ки. Для получения серосодержащих добавок был использован принцип взаимной нейтрализации токсичных промышленных отходов путем их совместной механохимической обработки. В качестве окислителя выступал трехвалентный оксид железа в виде пиритного огарка, а восстановителя - элементарная сера. Сера является многотоннажным отходом сероочистки нефтегазового сырья. Трехвалентное железо способно окислять серу, переходя затем в двухвалентное железо. Предварительно проведенная термодинамическая оценка вероятности прохождения химических реакций между компонентами с помощью стандартных термодинамических величин, электрохимических потенциалов и расчетов по реакциям связывания соединений железа (табл. 4.) показала, что восстановление пиритного огарка серой энергетически выгодно.

Таблица 4

Реакция системы с помощью э.д.с. (Е) электрохимических пар

Системы и реакции	э.д.с.(Е) электрохимические пары
$\text{Fe (III)} + \text{S}^\circ \rightarrow \text{Fe(II)} + \text{S (VI)};$	$E = 0,771 - (-0,13) = +0,784 \text{ (в)} > 0$

Величины стандартных энтальпий ΔH° и энтропий ΔS° при температуре 289° К, взятые из литературных источников, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения стандартных энтальпий ΔH°_{298} и энтропий ΔS°_{298} компонентов вяжущего

Вещество	ΔH°_{298} ккал/моль	ΔS°_{298} ккал/град·моль
SO ₂	-71,0	59,2
Fe ₃ O ₄	-266,5	35,0
FeS	-22,8	16,1
Fe ₂ O ₃	-145,2	21,5
FeS ₂	-38,8	12,7
FeO	-64,5	13,4

При механическом истирании и перемешивании серы и углерода с оксидами железа в присутствии воды в щелочной среде получены реакции окисления-восстановления и тепловые эффекты (расчеты по величинам изменения стандартных термодинамических потенциалов проводили при температуре 298°К), приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Тепловые эффекты реакций окисления-восстановления

Буквенные обозначения реакций	Системы и реакции	Тепловой эффект реакции, ΔH° ккал
А	$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{S} \rightarrow \text{FeS} + 4\text{Fe}_2\text{O}_3$	195,9
Б	$\text{FeS} + \text{S} \rightarrow \text{FeS}_2$	-16,0
В	$4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{S}^\circ \rightarrow \text{SO}_2 + 4\text{FeO}$	-38,6
Г	$2\text{FeO} + 3\text{S}^\circ \rightarrow 2\text{FeS} + \text{SO}_2$	12,4
Д	$\text{FeO} + \text{S} \rightarrow \text{FeOS}$	20,8

Из сравнения значений теплового эффекта и учета его знака можно сделать вывод, что реакции системах (А, Г, Д) в принципе термодинамически невозможны (ΔH), а остальные могут протекать при обычной температуре. Наиболее вероятны реакции системах (Б и В), т.к. они имеют, наибольшие значения ΔH . Следует отметить целесообразность проведения реакций в присутствии воды, когда ионы водорода связываются в нейтральные молекулы воды в щелочной среде, а диоксид серы в молекулы соли CaSO₃. Кроме того, из табл. 5 и 6 следует, что энтропийный фактор ΔS для этих реакций в конденсированной фазе не будет иметь определяющего ход реакции значения, т.к. направление процесса определя-

фазы при этом выше на 16 %. На рис. 11 и 12 представлены электронные фотографии микроструктуры образцов цементного камня и серосодержащих цементных образцов с добавкой серы в количестве 13%.

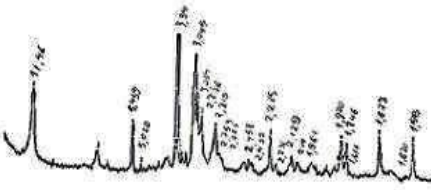


Рис. 8. Кривые РФА образцов серосодержащего цементного камня с добавкой серы в количестве 8 %

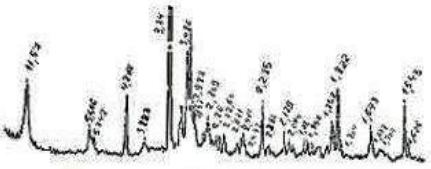


Рис. 9. Кривые РФА образцов серосодержащего цементного камня с добавкой серы в количестве 12 %

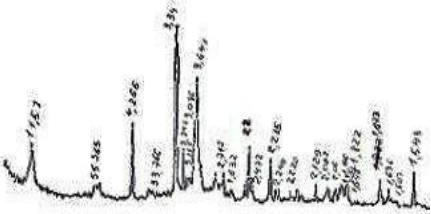


Рис. 10. Кривые РФА образцов серосодержащего цементного камня с добавкой серы в количестве 13 %

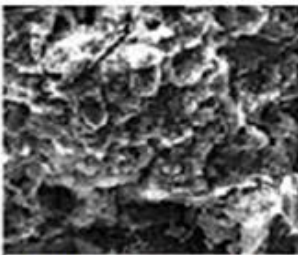


Рис. 11. Микроструктура образцов плотного цементного камня без добавок

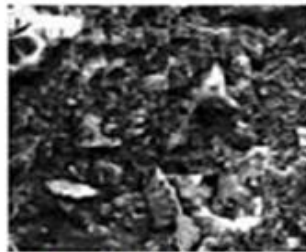


Рис. 12. Микроструктура образцов серосодержащего цементного камня с добавкой серы 13% по массе

Довольно узкие и сильные дифракционные отражения на картине РФА, четкий экзотермический эффект на ДТА, характерные для гидросиликатов кальция, в частности 1,1-нм тоберморита, позволяет судить об относительно высокой степени их кристалличности. Повышение относительного содержания в составе серосодержащего цементного камня 1,1-нм тоберморита и формирование мелкокристаллической структуры способствует снижению кристаллизационного давления в структуре материала и увеличению количества межкристаллических контактов, что приводит к повышению прочностных характеристик серосодержащих цементных образцов при введении добавок серы. Проведены исследования физико-механических свойств серосодержащего цементного камня при водотвердом отношении 0,385. Техническая сера вводилась в количестве 8 - 13% в комбинациях с пиритным огарком (18% пиритный огарок+8% сера), (18% пиритный огарок+12% сера), (20% пиритный огарок+13% сера) от массы сухих компонентов (табл.7). Введение добавки из технической серы в количестве 8-13 % увеличивает предел прочности образцов при сжатии в среднем на 17%, плотность серосодержащих образцов увеличивается в среднем на 9 - 10 %. Рациональным количеством добавки серы в состав вяжущего является 10 - 13 % от массы сухих компонентов смеси.

Характеристики серосодержащих вяжущих

№ п/ п	Состав вяжущего, %				Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Предел прочности, МПа	
	Серя	Пиритный огарок	Цемент	Вода		при сжатии	при изгибе
2	12	18	70	9,12	1570	65,9	9,14
3	13	20	67	9,27	1590	73,5	10,9

Оптимизация составов серосодержащего вяжущего выполнялась методом математического планирования эксперимента. В качестве параметров оптимизации приняты основные показатели серосодержащего вяжущего – прочность при сжатии и плотность образцов в сухом состоянии. Переменными величинами приняты: расход цемента (X_1), расход пиритного огарка (X_2) и отношение серы к пиритному огарку (X_3). Центр эксперимента и интервалы варьирования переменных приведены в табл. 8.

Таблица 8

Центр экспериментов и натуральные значения переменных

Переменные факторы	Код	Уровни варьирования			Интервал	Звездные точки	
		-1	0	+1		-1,215	+1,215
Расход цемента, кг/м ³	X_1	330	340	350	10	309	361
Расход пиритного огарка, кг/м ³	X_2	68	70	72	2	47	93
Отношение серы к пиритному огарку	X_3	0,400	0,525	0,650	0,125	0,380	0,670

Статистический анализ результатов позволил получить уравнение регрессии, описывающее параметры оптимизации с 95%-ной доверительной вероятностью:

$$Y_1(R_{сж}) = 24,88 + 8,83X_1 - 4,48X_2 - 1,02X_1^2 - 0,8X_2^2 - 2,98X_3^2 \text{ (МПа)}; \quad (3)$$

$$Y_2(P) = 1610 + 59,3X_1 - 139,6X_2 - 51,3X_3 - 9,9X_1^2 - 13,3X_2^2 + 6,17X_3^2 \text{ (кг/м}^3\text{)} \quad (4)$$

Анализ полученной модели прочности серосодержащего вяжущего показывает, что:

- наиболее значимым фактором, влияющим на прочность состава серосодержащего вяжущего является фактор X_1 - расход цемента, так как коэффициент при X_1 (+8,83) оказался наибольшим по абсолютной величине. С повышением расхода цемента прочность серосодержащего вяжущего возрастает и за пределами исследуемой области, но незначительно;
- вторым по значимости фактором, влияющим на прочность серосодержащего вяжущего, является X_2 - расход пиритного огарка. С увеличением содержания пиритного огарка прочность серосодержащего вяжущего падает за пределами исследуемой области, но с большой интенсивностью;
- менее значимо отношение серы к пиритному огарку (X_3). Отсутствие коэффициента при X_3 свидетельствует о том, что центр эксперимента выбран в области оптимума.

Оптимальным отношением серы к пиритному огарку является значение фактора X_3 , равное 0,525. Анализ математической модели плотности серосодержащего вяжущего свидетельствует, что наиболее значимым фактором состава, влияющим на плотность серосодержащего вяжущего, является фактор X_2 - расход пиритного огарка, т.к. коэффициенты при X_2 (-138,6) и X_2^2 (+13,3) оказались наибольшим по абсолютной величине.

По графическому материалу и математическим моделям прочности и плотности серосодержащего вяжущего, данным, полученным в ходе реализации эксперимента, выполнен расчет составов серосодержащего вяжущего, которые приведены в табл. 9.

Свойства серосодержащих вяжущих составов при различных соотношениях компонентов

Состав вяжущего, по массе, % (цемент: пиритный огарок: сера)	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Влажность, %	Предел прочности при сжатии, МПа
74:18:8	1590	9,89	64,7
70:18:12	1570	9,12	65,9
67:20:13	1590	9,27	73,5

Из табл. 9 видно, что на всем диапазоне изменения предела прочности при сжатии серосодержащего вяжущего расходы цемента существенно ниже нормируемых значений соответствующего класса вяжущего. Как видно из рис. 13, 14 и табл. 9, введение добавки серы в количестве 8 -13% обеспечивает требуемое значение предела прочности при сжатии серосодержащего вяжущего от 64,7 до 73,5 МПа. Оптимальным составом серосодержащих вяжущих является, по массе в %: цемент 67%:пиритный огарок 20%: сера 13%.

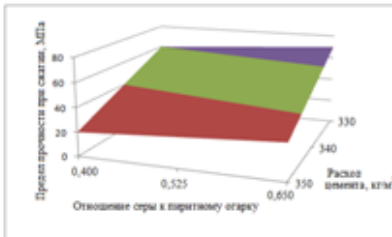


Рис. 13. Зависимость предела прочности серосодержащего вяжущего при сжатии от расхода цемента и отношения серы к пиритному огарку при расходе серосодержащих компонентов 70 кг/м³

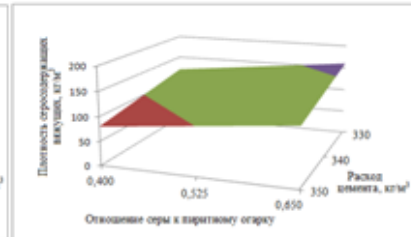


Рис. 14. Зависимость плотности серосодержащего вяжущего от расхода цемента и серы к пиритному огарку при расходе серосодержащих компонентов 70 кг/м³

Проводилось исследование свойств растворной смеси и камня вяжущего. Свойства растворной смеси определяли по срокам схватывания серосодержащих вяжущих при различных массовых соотношениях цемента, пиритного огарка, технической серы (табл. 10). Установлено, что серосодержащие вяжущие является быстросхватывающимися, на сроки схватывания влияет количество вводимой железосеросодержащей добавки и цемента. С увеличением количества цемента сроки схватывания уменьшаются.

Таблица 10

Сроки схватывания серосодержащих вяжущих составов

№ п/п	Расходы серосодержащих вяжущих составов, %			Сроки схватывания, ч-мин	
	расход цемента, %	расход пиритного огарка, %	расход технической серы, %	Начало	конец
1	74	18	8	0-55	2-15
2	70	18	12	1-10	2-25
3	67	20	13	1-20	2-35

Физико-механические свойства камня серосодержащих вяжущих определяли по пределу прочности при сжатии. Найдено, что изменение прочности во времени

разработанных серосодержащих вяжущих композиций зависит от их состава, условий обработки и последующего твердения.

Результаты испытаний показали, что серосодержащий камень вяжущего продолжает набирать прочность в течение длительного времени - более 180 суток. Предел прочности при сжатии образцов может достигать 75 МПа (табл. 11).

Таблица 11

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ и изгибе $R_{изг}$ серосодержащих вяжущих составов в зависимости от времени и условий твердения, МПа

№ п/п	Продолжительность твердения, сут	Содержание вяжущих составов, % по массе (цемент : пиритный огарок : сера)	Естественное твердение		После тепловой обработки	
			$R_{изг}$, МПа	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	$R_{сж}$, МПа
1	28	74:18:8	5,1	54,7	5,5	64,7
2	90	70:18:12	5,2	55,9	5,6	65,9
3	180	67:20:13	5,3	56,5	6,4	73,5
4	28	74:18:8	5,32	56,7	5,9	65,7
5	90	70:18:12	5,33	56,9	5,93	66,9
6	180	67:20:13	5,4	57,5	6,5	74,5
7	28	74:18:8	5,5	58,7	5,94	65,9
8	90	70:18:12	5,6	58,9	6,55	70,9
9	180	67:20:13	5,62	59,5	6,95	75,1

В пятой главе приведены результаты исследования влияния основных составляющих компонентов на формирование микроструктуры и прочностные свойства серосодержащего арболита. В качестве исходных пористых заполнителей для получения серосодержащих арболитов использовались органические заполнители из отходов растительности согласно ГОСТ 19222. Анализ изменения свойств заполнителей показал, что для арболита на серосодержащем вяжущем наиболее предпочтительны измельченные стебли тростника. Составы серосодержащего арболита с использованием тростника приведены в таблице 12.

Таблица 12

Составы исследуемых серосодержащих арболитов

№ состава	Расход материалов 1м ³ арболита				Плотность, кг/м ³
	Измельченные стебли тростника, кг	Техническая сера, кг	Пиритный огарок, кг	Цемент, кг	
1	255	25	80	270	450
2	260	23	82	260	420
3	250	25	80	280	550
4	240	27	78	300	500
5	230	30	75	320	600
6	200	35	70	350	650

Оптимизацию состава, свойств и технологии серосодержащего арболита выполняли опытным путем и с помощью методов математического планирования эксперимента. Было изучено влияние пористой структуры органического заполнителя на характер контактной зоны с камнем вяжущего. Для оценки микромеханических свойств контактных слоев серосодержащего камня и заполнителя был использован метод определения микротвердости. Испытания проводились на полированных шлифах образцов-кубов размером 30x30x30 мм из серосодержащего цементного теста, в середину которых помещали фибру измельченно-

го тростника. Так как основные изменения структуры контактных слоев серосодержащего цементного камня связаны с миграцией влаги в органическом заполнителе, была установлена зависимость изменения микротвердости камня вяжущего на исходном растворе и с разным соотношением компонентов в 3-х и 28-суточном возрасте. Совместно с измерениями микротвердости были проведены испытания предела прочности при сжатии образцов. Исследование структуры контактных зон серосодержащего вяжущего с измельченным мерсеризованным тростником показали, что она имеет плотную и прочную оболочку вяжущего шириной 35-60 мкм. Благодаря высокой пористости органического заполнителя, вяжущее проникает в глубь зерна заполнителя на 105 – 135 мкм. Пористая оболочка тростника вследствие эффекта вакуумирования способствует глубокому вовлечению внутрь вяжущего, которое, взаимодействуя с поверхностью стенок пор заполнителя, активирует их. Сера, являясь сильным восстановителем, может влиять на морфологию и химический состав поверхности органического заполнителя арболитов. Предварительная обработка щелочным серосодержащим раствором приводит к мерсеризации целлюлозы, в результате чего она приобретает дополнительные (ОН⁻) группы, что в свою очередь придает ей повышенную сорбционную способность к ионам многовалентных элементов.

Проведено исследование изменения предела прочности при сжатии при длительных нагрузках серосодержащего арболита в 7-ми, 14-ти, 28-ми, 60-ти и 90 суточном возрасте с использованием измельченных стеблей тростника (рис. 15).

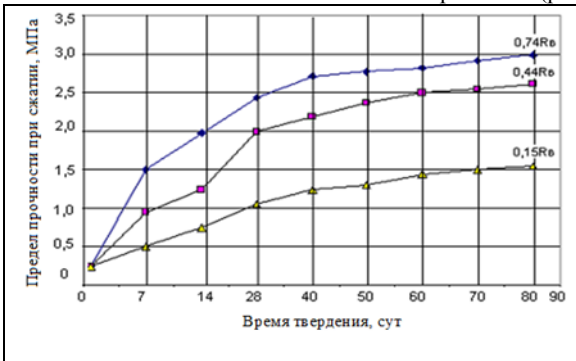


Рис 15. Предел прочности при сжатии серосодержащего арболита в зависимости от времени твердения при различных составах и нагрузках: ▲ – при 26% -ной серосодержащей добавке; ■ – при 30% -ной серосодержащей добавке; ◆ – при 33% -ной серосодержащей добавке

Как показывают эксперименты прочность серосодержащего арболита продолжает возрастать даже к 90 суточному возрасту, хотя в этот период рост прочности происходит менее интенсивно, чем в начальный. Полученные результаты дают основание утверждать, что в нагруженном состоянии мерсеризованной органический заполнитель оказывает большое сопротивление нагрузкам, упрочняется и может воспринимать даже большую нагрузку, чем в ненапряженном состоянии. По-видимому, формирование нано- и микроструктуры мерсеризованного органического заполнителя происходит за счет возникновения своеобразной эффекта «дуб-

ления» волокон стебля тростника и изменения модуля деформации составляющих серосодержащего арболита при нагрузке. Термодинамический весьма вероятными процессами являются реакции «сшивки» длинных органических молекул целлюлозы серой в результате реакций поликонденсации. С другой стороны, причиной увеличения прочности заполнителя является «кольматация» пор мерсеризованной целлюлозы серосодержащим составом арболита, который затвердевая, вызывает повышение прочности получаемого изделия. Оценку влияния мерсеризованной целлюлозы на прочностные свойства серосодержащего арболита проводили на арболитовых кубах плотностью 550-600 кг/м³. Исследования показали, что мерсеризация тростника снижает воздействие его водорастворимых компонентов на сроки схватывания и набор прочности арболита по сравнению с необработанными образ-

цами. По-видимому, в процессе мерсеризации из стеблей тростника выщелачиваются водорастворимые сахаристые вещества, органические кислоты и минеральные соли. Поэтому в процессе изготовления арболита мерсеризация может заменить операцию предварительного замачивания тростника в растворах химических добавок. Определение предела прочности при сжатии у серосодержащих арболитов с использованием рисовой лузги, мерсеризованного и немерсеризованного тростника показали, что наибольший прирост прочности наблюдается у арболитов с использованием мерсеризованного тростника и составляет 2,5 МПа (рис 16).

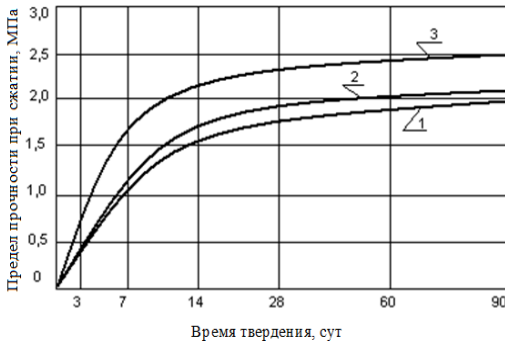


Рис 16. Предел прочности при сжатии серосодержащего арболита в зависимости от времени твердения и различных органических заполнителей: 1 – рисовой лузге; 2 – необработанном тростнике; 3 – мерсеризованном тростнике

Результаты исследования, составы и свойства серосодержащего арболита приведены в табл. 13. Согласно общим методам проектирования оптимального состава искусственных строительных конгломератов, при проектировании расхода измельчен-

ных стеблей тростника и серосодержащих вяжущих компонентов для арболита использовался метод математического планирования экспериментов.

Таблица 13

Составы и свойства серосодержащего арболита на основе мерсеризованных стеблей тростника

Компоненты арболитовой смеси	Единицы измерения	Класс по прочности арболита	
		В 2,5	В 3,5
Цемент	%	35	36
Мерсеризованные стебли тростника	%	20	21
Вода на 1м ³ смеси при сухих органических заполнителях	%	30	31
Техническая сера	%	3,2	3,6
Пиритный огарок	%	6,9	7,2
Минерализаторы - хлорид кальция; - хлорид бария	% %	0,4 1,4	0,5 1,6
Плотность	кг/м ³	550-590	590-650
Предел прочности при сжатии	МПа	2,1	2,5
Водопоглощение	%	67	45
Морозостойкость	цикл	50	75
Коэффициент теплопроводности	Вт/м*К	0,100	0,135

При этом в качестве независимых переменных параметров входа приняты расходы измельченного тростника (x_1) и серосодержащего вяжущего (x_2), а в качестве выходных параметров - предел прочности при сжатии (y_1) и плотность арболитобетона (y_2).

После подсчета коэффициентов получили уравнение регрессии для предела прочности при сжатии и плотности арболита:

$$y_1 = -0,605 + 0,075x_1 + 0,02x_2; \quad (5)$$

$$y_2 = 117,5 - 1,125x_1 + 0,7x_2. \quad (6)$$

Расчет основных компонентов состава арболита сводится к совместному решению уравнений (5) и (6). Коэффициенты уравнений регрессии показывают, что предел прочности серосодержащего арболита зависит как от расхода серосодержащего вяжущего так и органического заполнителя. Расчетные расходы для конструктивно-теплоизоляционных арболитов с предельной прочностью при сжатии не менее 2,5 МПа компонентов на 1 м^3 изделия составляют: измельченного тростника – 204 кг, серосодержащего вяжущего – 345 кг. С предельной прочностью при сжатии не менее 2,0 МПа: измельченного тростника – 209 кг, серосодержащего вяжущего – 335 кг. Для теплоизоляционных арболитов с предельной прочностью при сжатии не менее 1,5 МПа: измельченного тростника – 216 кг, серосодержащего вяжущего – 321 кг (таб. 14, рис 17). Таким образом, предложенная методика определения состава серосодержащего арболита, основанная на теории искусственных строительных конгломератов и методе математического планирования эксперимента, позволяет проектировать составы с заданными свойствами.

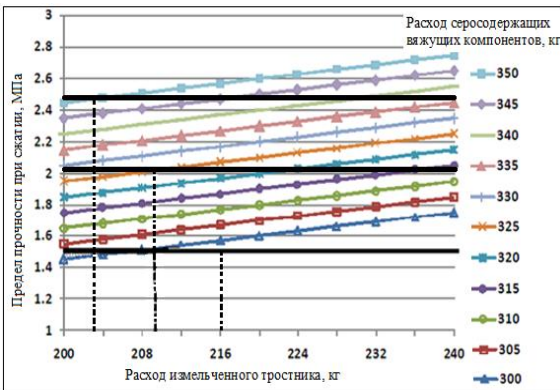


Рис. 17. Прочность серосодержащего арболита в зависимости от расхода вяжущих компонентов и органического заполнителя

Составы и физико-механические свойства серосодержащего арболита приведены на рис 17 и в табл. 14, 15. Как видно из приведенных данных водопоглощение и коэффициент теплопроводности у всех типов серосодержащего арболита ниже по сравнению с водопоглощением и коэффициентом теплопроводности у портландцементных арболитов. Испытания показали, что оптимальные условия для твердения серосодержащего арболита создаются при тепловой обработке, прочность таких изделий в среднем в 1,5 раза выше, чем

у образцов нормального твердения. При этом возрастает сцепление заполнителя с серосодержащим цементным камнем.

Таблица 14

Состав серосодержащей арболитовой смеси

Компоненты	Теплоизоляционный арболит		Теплоизоляционно-конструкционный арболит	
	% по массе	расход на 1 м^3 , кг	% по массе	расход на 1 м^3 , кг
Портландцемент	33,3	321	34,9	345
Сера (отходы)	3,6	35	3,64	36
Пиритный огарок	7,2	70	7,3	72
Измельченный тростник	22,4	216	20,6	204
Хлорид кальция	0,6	5	0,52	5
Хлорид бария	1,6	16	1,64	16
Вода	31,3	300	31,4	310

Исследования показали, что серосодержащий арболит обладает морозостойкостью не менее 35 циклов.

Физико-механические свойства серосодержащего арболита

Свойства	Теплоизоляционный	Теплоизоляционно-конструкционный	Теплоизоляционно-конструкционный
Плотность, кг/м ³	550	590	630
Предел прочности при сжатии, МПа	1,6	2,0	2,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/м ⁰ К	0,11	0,115	0,117
Водопоглощение, %	51	50	49

Заполнение поровой структуры арболита серосодержащим вяжущим значительно снижает водопоглощающую способность материала, что объясняет повышение его сопротивляемости к попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии. Высокие эксплуатационные свойства серосодержащего арболита позволяют рекомендовать его для изготовления арболитовых блоков, предназначенных для малоэтажных зданий.

В шестой главе приведены результаты исследования механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита в зависимости от растворной и органической составляющих компонентов. Для исследования поведения серосодержащего арболита в несущих и ограждающих конструкциях были проведены испытания изменения его прочностных характеристик при различных сжимающих напряжениях ($0,15R_{пр}$, $0,45R_{пр}$, $0,75R_{пр}$). Где $R_{пр}$ -призменная прочность серосодержащего арболита. Исследования проводились на образцах серосодержащего арболита в 7-ми, 28-ми и 90 сутокном возрасте. Для изучения влияния возникающих деформаций на предел прочности при сжатии арболита арболитовый камень рассматривался как двухкомпонентная система, состоящая из фибры измельченного тростника и серосодержащей растворной составляющей, при этом прочность растворной части была величиной переменной. На рис. 18 показано изменение ползучести серосодержащего арболита в зависимости от уровня и времени нагружения.

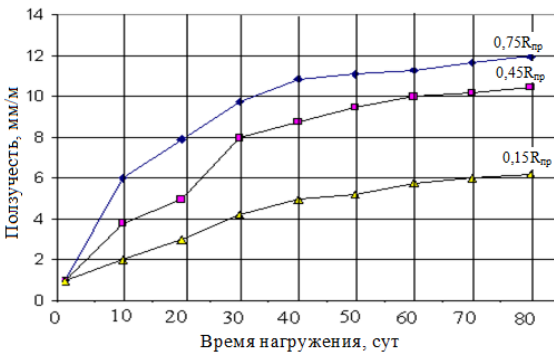


Рис. 18. Изменение ползучести серосодержащего арболита в зависимости от уровня и времени нагружения:

- ◆ - серия I;
- - серия II;
- ▲ - серия III

Для проведения исследования было изготовлено образцы из серосодержащего камня вяжущего, из серосодержащего вяжущего и фибр измельченного тростника диаметром около 18-20 мм и для сравнения – из серосодержащего керамзитобетона. Фибры тростника помещались в середину образцов-призм. Образцы подвергались тепловой обработке. Регистрация продольных и поперечных деформаций в процессе нагружения образцов выполнялась тензорезисторами с базой 10-50 мм, наклеенными с помощью клея на фибры, ориентированными вдоль и перпендикулярно прилагаемой нагрузке к призмам. Во избежание по-

вреждения тензометрических датчиков производилась их защита эпоксидной смолой. При длительных испытаниях постоянную нагрузку на испытываемые образцы создавали с помощью специально изготовленных пружинных установок. Интервал максимальной нагрузки на испытываемые образцы варьировался от 60 до 120 кН.

После естественного твердения на образцы давали поэтапно нагрузку с помощью пресса, которую фиксировали манометром при включенных автоматических измерителях деформаций (рис. 19, 20). Исследования показали, что глубинные тензометрические датчики, расположенные в серосодержащей растворной составляющей материала, фиксируют момент его разрушения и достижение предельной растяжимости серосодержащего арболита в призмах перпендикулярно действующей нагрузке пресси. При этом тензометрические датчики, закрепленные, на фибрах измельченного тростника и ориентированные вдоль и поперек действующей нагрузки продолжают показывать рост деформаций, а манометр пресси продолжает показывать рост напряжений. Эти эффекты не выявляются в серосодержащем арболите пористого или крупнопористого строения низкой плотности менее 500 кг/м^3 .

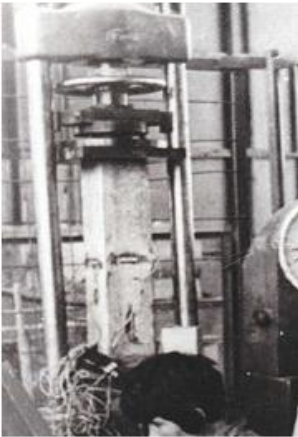


Рис. 19. Нагрузка призм-образцов гидравлическим прессом

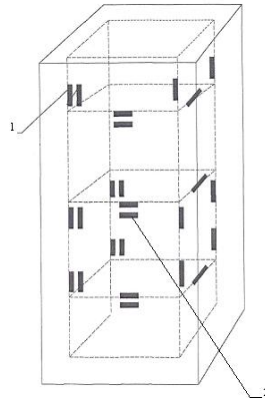


Рис. 20. Схема установки глубинных тензодатчиков: 1- датчик на фибрах тростника; 2- датчик в растворной составляющей

При испытаниях серосодержащего арболита плотного строения одновременного разрушения серосодержащей растворной составляющей и органического заполнителя не происходило. При испытании серосодержащего арболита плотного, пористого и крупнопористого строения, существенное значение имела поверхность сцепления фибры измельченного тростника с серосодержащей растворной составляющей. Для пористого и крупнопористого материала прочность сцепления растворной составляющей была больше, чем прочность органического заполнителя. Проведенные исследования дают основание для уточнения гипотез формирования прочности и причины разрушения серосодержащего арболита. Для объяснения повышения прочности серосодержащего арболита плотного строения во второй фазе твердения, теория твердения требует дополнительного уточнения, так как одновременного разрушения органического заполнителя и растворной составляющей не наблюдается. Так при меньшей прочности серосодержащего раствора по сравнению с прочно-

стью заполнителя происходит однофазное твердение и одноступенчатое разрушение – по раствору. При большой прочности серосодержащего раствора по сравнению с прочностью органического заполнителя происходит двухфазное твердение и двухступенчатое разрушение. Прочность серосодержащего арболита пористого строения формируется в одну фазу, разрушение происходит одноступенчатое – по кольматированному органическому заполнителю, прочность которого и определяет в основном прочность материала. Проведенные исследования позволяют направлено планировать получение серосодержащего арболита различной прочности в зависимости от длины фибры заполнителя.

Седьмая глава диссертационного исследования посвящена описанию технологий производства и расчета технико-экономической эффективности выпуска арболитобетонов на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов. Разработаны технологии по производству арболита на основе шлакощелочных и серосодержащих вяжущих и отходов из травянистых растений пористой и плотной структур, учитывающие особенности новых композиционных вяжущих и органического заполнителя. Подсчитан экономический эффект от производственного выпуска шлакощелочных арболитовых теплоизоляционных блоков на основе измельченных стеблей хлопчатника, который составил 577400 руб. в год.

Произведен расчет экономической эффективности применения арболита на серосодержащем вяжущем. Показано, что при мощности цеха 2500 м³ арболитовых изделий в год по предлагаемому способу ожидаемый экономический эффект составит 425040 руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощью методов системного анализа и теоретических подходов разработаны принципы и научные основы получения высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, методологически обоснована целесообразность комплексного регионального использования промышленных и сельскохозяйственных отходов. Проведен комплексный анализ особенностей структуры и свойств арболита в зависимости от его состава. Показано, что органическая составляющая бетона оказывает сильное влияние на его свойства, поэтому для получения высокопрочных бетонов требуется разработка новых комплексных вяжущих и применение нетрадиционных добавок. Найдено, что применение шлаков и серосодержащих отходов в качестве шлакощелочных и серосодержащих вяжущих, обладающих высокой активностью и приводящих к возникновению структурообразующих элементов, может привести к повышению прочностных характеристик арболита. Показана возможность использования технической серы и серосодержащих отходов в составах бетонов различного назначения включая арболитобетон. Дана комплексная оценка влияния растворимых компонентов органического заполнителя на сроки схватывания и твердения различных вяжущих, а также на физико-механические свойства арболитобетонов.

2. Выявлены закономерности получения шлакощелочных вяжущих с добавкой высококальциевой золы-уноса повышенной адгезионной способности к органическим заполнителям арболитобетона. Показано, что шлакощелочные композиции с добавкой золы-уноса обладают вяжущими свойствами, а фазовый состав продуктов твердения определяет характер этих свойств. Изучение физико-химических процессов взаимодействия шлакощелочных вяжущих показало, что их фазовый состав определяется видом щелочного компонента и добавки. В продуктах твердения разработанных вяжущих композиций образуются низкоосновные гидросиликаты типа гиролита, гиллебрандита, трускотита, тоберморита и щелочные новообразования – аналоги природных цеолитов, а также кальцит.

Установлена возможность регулирования свойств вяжущих одинаковых марок путем варьирования соотношения состава вяжущего и изменения соотношения факторов. Найдено, что прочность щелочных вяжущих с добавкой золы – уноса, зависит от дисперсности

золи и ее гранулометрического состава. Показано, что наибольшее влияние на прочность вяжущего оказывает плотность и силикатный модуль щелочного компонента. Оптимальное растворшлаковое отношение для шлакощелочной арболитовой смеси находится в пределах 0,8- 1,1 в зависимости от вида органического заполнителя. Установлено, что рациональное соотношение в шлакощелочном вяжущем активных минеральных добавок высококальциевой золы-уноса и электротермофосфорного шлака по массе 1:1, что приводит к повышению его прочности на 50–70 %.

3. Установлено, что введение в состав арболита щелочных компонентов комплексных добавок на основе силиката натрия и содосульфатной смеси приводит к появлению новых гидратных соединений, при этом повышается степень гидратации шлакощелочного камня. Проведенные исследования показали, что введение в качестве добавки содосульфатной смеси значительно углубляет гидратацию шлакового стекла, а также способствует образованию волокнистых гидросульфалоуминатов кальция, выполняющих роль дополнительной арматуры и уплотняющих структуру камня вяжущего. Разработан состав комплексного шлакощелочного вяжущего, который включает в % по массе: электротермофосфорный шлак 46; содосульфатную смесь 8; добавку золы-уноса 46.

4. Определены возможные механизмы взаимодействия шлакощелочных вяжущих с органической составляющей арболитов. Установлено, что щелочной компонент вяжущего взаимодействуют с органическим заполнителем позволяя создать оптимальную макроструктурную композицию и обеспечить высокую прочность и долговечность конгломератов в целом. Изучены физико-химические процессы на контакте «заполнитель - шлакощелочной раствор», характер которых определяют адгезионные связи между органическими заполнителями и шлакощелочным вяжущим камнем. Найдено, что большое значение имеет пористое строение заполнителя, вызывающее отсасывание влаги арболитом из смеси, которое приводит к усилению адгезионных контактов между вяжущим и шероховатыми поверхностями стеблей заполнителя. Установлено влияние растворимых компонентов органического заполнителя - «простых сахаров» на свойства шлакощелочного арболита. Показано, что снижение прочности арболита при введении шлакощелочного раствора и его составляющих в арболитовую смесь происходит только при концентрации сахара в водоэкстрактивных веществах на поверхности заполнителя более 0,1 мас. %. Установлено, что в присутствии нейтрализаторов и ускорителей твердения основной минералов, придающим прочность шлакощелочному арболиту является содосульфатная смесь.

5. Получены зависимости, описывающие скорость набора прочности шлакощелочных арболитовых композиций на основе хлопчатника в процессе твердения. Установлены закономерности комплексного влияния органических и неорганических компонентов шлакощелочного арболита на формирование его микроструктуры и прочностных характеристик. Результаты показывают, что для получения материала с высокими прочностными качествами и структурной однородностью оптимальное растворшлаковое отношение Р/Ш для шлакощелочной арболитовой смеси должно находиться в зависимости от типа органического заполнителя в пределах 0,8–1,1.

Разработаны составы шлакощелочного арболитобетона на основе хлопчатника, получены изопараметрические диаграммы графической интерпретации результатов многофакторных экспериментальных исследований, позволяющие оптимизировать составы вяжущих растворов и хлопчатника для различных видов арболитобетонов – теплоизоляционных, конструкционных и т.п. Так установлено, что для получения арболита марки 25 при содержании стеблей хлопчатника 90 кг/м^3 и при расходе щелочного компонента 300 л/м^3 , содержание золы-уноса должно составлять 250 кг/м^3 , а при расходе стеблей хлопчатника 120 кг/м^3 , и щелочного компонента 300 л/м^3 расход золы-уноса составляет 210 кг/м^3 . Определено, что наиболее оптимальными фракциями, для теплоизоляционно-

конструкционного арболита, являются измельченные стебли хлопчатника, имеющие размеры фракции фибры стеблей не менее 18 - 20мм.

6. Исследовано влияние тепловлажностной и тепловой обработок на прочностные характеристики шлакощелочного арболита. Найдено, что тепловлажностная обработка негативно влияет на свойства органической составляющей арболита. Результаты показали, что вяжущие с добавками высококальциевой золы-уноса и электротермофосфорного шлака, в соотношении по массе 1:1, имеют прочность при сжатии после тепловой обработки от 57,0 до 63,9 МПа, что свидетельствует о ее благоприятном влиянии на набор прочности вяжущего. Найдено, что после тепловой обработке предел прочности арболитовых образцов с содосульфатной смесью при сжатии до 19 % выше, чем у образцов, подвергнутых тепловлажностной обработке и составляет 2,1 и 2,5 МПа соответственно.

7. Установлено влияние добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства композиционных вяжущих для получения арболитобетонов повышенной прочности. Найдено, что наиболее эффективным способом введения добавок технической серы является их совместный помол с железосодержащими сырьевыми материалами в виде пиритного огарка. Результаты проведенного термодинамического расчёта свидетельствуют о наиболее вероятном протекании процесса связывания серы с оксидами железа при механическом воздействии при температурах, близких к нормальным. Установлено, что механизм активации заключается во взаимодействии вновь обнажающихся поверхностей частиц вяжущего при мокром домоле, интенсификации процесса коагуляции вяжущей смеси и интенсивном образовании каркаса кристаллической решётки за счет образования кристаллогидратов. Определено, что введение добавок серы в цементное вяжущее в количестве 8 - 13 % от массы сухих компонентов смеси вызывает их уплотняющее и упрочняющее действие. На основании результатов фазового исследования установлено, что повышение прочностных характеристик серосодержащих цементных вяжущих происходит в результате повышения относительного содержания в их составе 1,1-нм тоберморита и формирования мелкокристаллической структуры, которое способствует снижению кристаллизационного давления в структуре материала и увеличению количества межкристаллических контактов. Установлено, что введение серосодержащей добавки в количестве 8 - 13%, обеспечивает повышение прочности камня вяжущего до 73,5 МПа при содержании цемента в составе смеси 67 % по массе.

8. Проведено исследование влияния основных составляющих компонентов на прочностные свойства серосодержащего арболита. Исследование влияния заполнителя на физико-механические свойства арболита и сцепление его с камнем вяжущего показали, что микротвердость контактного слоя серосодержащего вяжущего с измельченным тростником равна 1550 МПа, что примерно на 15% выше микротвердости камня вяжущего в межзерновом пространстве. Контактная зона между серосодержащим вяжущим и измельченным тростником отличается плотным строением, ширина ее составляет 105-135 мкм.

9. Проведено исследование влияния химических добавок на свойства органического заполнителя и серосодержащего арболита. Термодинамическими расчетами и экспериментами показано, что соединения железа (VI) в виде феррата натрия Na_2FeO_4 химически разрушают сахараы целлюлозы, что ведет к увеличению адгезии между органическими и неорганическими компонентами арболитобетонов. Найдено, что обработка щелочным серосодержащим раствором (мерсеризация) может заменить операцию предварительного замачивания тростника в растворах химических добавок. Установлено, что в нагруженном состоянии мерсеризованной заполнитель упрочняется и может воспринимать большую нагрузку, чем в ненапряженном состоянии. Происходит своеобразный эффект «дубления» волокон и «кольматация» пор мерсеризованной целлюлозы элементарной серой, что приводит к улучшению как прочностных свойств органического компонента, так и стойкости

целлюлозы к биокоррозии. Результаты исследования показали, что оптимальным органическим наполнителем для серосодержащего арболита являются измельченные отходы тростника.

10. Разработаны составы и выявлен характер влияния основных составляющих компонентов на физико-механические свойства серосодержащего арболита с использованием тростника. С помощью методов регрессионного анализа определены оптимальные составы теплоизоляционного, теплоизоляционно-конструкционного и конструкционного арболитов. Предложено с помощью метода трехфакторного эксперимента планировать расходы стеблей тростника и серосодержащих вяжущих компонентов для арболита. Так расчетные расходы для конструкционно-теплоизоляционного арболита на 1 м^3 изделия составляют: измельченного тростника – 204 кг, серосодержащего вяжущего – 345 кг, для теплоизоляционного арболита - тростника – 216 кг, вяжущего – 321 кг.

11. Определены физические и физико-механические характеристики расчетных составов арболитов. Установлено, что серосодержащий арболит обладает морозостойкостью не менее 35 циклов и повышенной огнестойкостью. Установлены оптимальные условия твердения серосодержащего арболита. Найдено, что лучшие условия для твердения серосодержащего арболита создаются при тепловой обработке, прочность таких изделий в среднем в 2,3 раза выше, чем у арболита нормальной твердения.

12. Установлены закономерности влияния механизма формирования прочности и разрушения серосодержащего арболита в зависимости от вида и способа нагружения при использовании его в строительных конструкциях. Найдена зависимость прочностных характеристик и ползучести серосодержащего арболита от свойств вяжущего и органического наполнителя. Найдено, что упрочнение органического наполнителя в изучаемом диапазоне напряжений до $0,8 R_3$ (кубиковая прочность органического наполнителя) происходит за счет уменьшения внутрестеблевой пористости и возникновения эффекта «обоймы». Показано, что в серосодержащем арболите соотношение между кубиковой и призменной прочностью приближается к единице и даже превосходит ее. Поэтому, при нормировании коэффициента призменной прочности серосодержащего арболита рекомендуется принимать на 20-25% выше, чем для легких и ячеистых бетонов.

13. Разработана методика анализа кривых деформирования серосодержащих арболитовых материалов при сжатии, позволяющая определять точки «критических» состояний композита в процессе нагружения. Экспериментально доказано, что при нагружении серосодержащего арболита плотного строения происходит не одновременное, а последовательное разрушение растворной составляющей и органического наполнителя во второй фазе твердения. В первой фазе твердения происходит разрушение материала только по растворной составляющей. Установлено, что прочность серосодержащего арболита пористого строения формируется в одну фазу, разрушение происходит одноступенчатое – по кольматированному органическому наполнителю. Характер разрушения образцов из серосодержащего арболита в различном возрасте наглядно иллюстрируют высказанные дополнения к гипотезам формирования прочности серосодержащего арболита и механизма его разрушения. Выявлено, что наименьшей пористостью и, как следствие, наиболее высокими прочностными показателями обладают составы, содержащие комплексные добавки с технической серой Жанажолского месторождения и пиритным огарком Алгинского химкомбината «Фосфохим».

Изучено поведение блоков из серосодержащего арболита в кладке. Найдено, что относительная прочность кладки из мелких серосодержащих арболитовых блоков близка с относительной прочностью кладки из крупных блоков. Это объясняется тем, что хотя мелкие блоки имеют сопротивление изгибу и срезу ниже, чем крупные, однако при кладке из мел-

ких блоков значительно легче создать равномерный горизонтальный шов, обеспечивающий равномерную передачу усилий на камень.

14. Разработаны технологии по производству арболита на основе шлакощелочных и серосодержащих вяжущих и отходов из травянистых растений пористой и плотной структур, учитывающие особенности новых композиционных вяжущих и органического заполнителя. Описанная технология для получения шлакощелочного арболита по сравнению с традиционными технологиями арболита позволит в 1,7–1,9 раза сократить время и энергозатраты при приготовлении арболитовой смеси, в 2–2,5 раза – время укладки и уплотнения смеси, в 7–8 раз – длительность цикла твердения изделий, в 1,8–2,5 раза – удельную металлоемкость производства. На базе Актюбинского завода железобетонных изделий произведен выпуск шлакощелочных арболитовых теплоизоляционных блоков на основе измельченных стеблей хлопчатника. Экономический эффект от применения разработанного состава арболита составил 577400 руб. в год.

Также показано, что отличительной особенностью получения изделий из серосодержащего арболита по сравнению с известной технологией является наличие поста механохимической активации и детоксикации серосодержащих вяжущих, мерсеризация целлюлозного органического заполнителя, а также операционные работы с добавками хлорида кальция и бария. Выбранная технология позволяет в 1,6–1,8 раз сократить время и энергозатраты при приготовлении арболитовой смеси, в 2–2,5 раза время укладки и уплотнения смеси, в 2–2,5 раза – удельную металлоёмкость производства, длительность твердения – в 6–7 раз. На производственном участке ТОО «Региональный индустриальный технопарк Актобе» выпущена партия стеновых серосодержащих арболитовых блоков. Экономический эффект от применения разработанного состава арболита составил 425040 руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Акулова, М.В. Разработка состава и исследование свойств поризованного арболита / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов // Приволжский научный журнал, 2013, № 2. - Н. Новгород, ННГАСУ, 2013. С. 41–45.
2. Акулова, М.В. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов // Вестник ВолГАСУ. Серия: строительство и архитектура. Вып. 31 (50), ч. 2. Строительные науки. – Волгоград, 2013. С. 75–80.
3. Исакулов, Б.Р. Гипсохромошламовые вяжущие из производственных отходов / Б.Р. Исакулов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 2. С. 99–103.
4. Исакулов, Б.Р. Использование промышленных и сельскохозяйственных отходов Казахстана для получения легких бетонов / Б.Р. Исакулов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 4. С. 167–172.
5. Исакулов, Б.Р. Улучшение физико-механических свойств легких бетонов путем пропитки серой – отходом нефтегазовой промышленности Казахстана / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив, А.М. Сарсенов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 4. С. 183–187.
6. Исакулов, Б.Р. Методики испытаний ползучести поризованных легких бетонов при длительнонагружении и различных сжимающих напряжениях / Б.Р. Исакулов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 5. С. 140–147.
7. Исакулов, Б.Р. Исследование прочностных характеристик поризованных легких бетонов на основе отходов промышленности и растительного сырья Центральной Азии / Б.Р. Исакулов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 5. С. 125–131
8. Исакулов, Б.Р. Повышение физико-механических свойств арболитобетонов методом пропитки серой – отходом нефтегазовой промышленности Западного Казахстана / Б.Р.

Исакулов, А.С. Жив, А.М. Сарсенов // Вестн. Кырг.-слав. ун-та. Бишкек, 2011. № 4. С. 161–163.

9. Исакулов, Б.Р. Использование промышленных и сельскохозяйственных отходов Западного Казахстана для получения легких бетонов / Б.Р. Исакулов // Вестн. Кырг.-слав. ун-та. Бишкек, 2011. № 4. С. 163–167.

10. Исакулов, Б.Р. Исследование свойств шлакощелочных вяжущих / Б.Р. Исакулов // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 6. С. 64–68.

11. Исакулов, Б.Р. Производство строительных материалов и изделий на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов Казахстана / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2011. № 6. С. 77–81.

12. Исакулов, Б.Р. Повышение физико-механических свойств легких бетонов путем пропитки отходами нефтегазовой промышленности Казахстана / Б.Р. Исакулов, А.М. Сарсенов // Вестн. Астрах. гос. ун-та «Геология, география и глобальная экология». 2011. № 4. С. 3–8.

13. Исакулов, Б.Р. Загрязнение рек бассейна Каспийского моря промышленными отходами и пути его решения / Б.Р. Исакулов, А.М. Сарсенов // Вестн. Астрах. гос. ун-та «Геология, география и глобальная экология». 2011. № 4. С. 136–141.

14. Исакулов, Б.Р. Разработка оптимальных составов поризованного арболита методом математического планирования экспериментов / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив, Сара Галебуй // Механизация строительства. М., 2012. № 9. С. 22–26.

15. Исакулов, Б.Р. Исследование золошлаковых вяжущих на основе отходов топливно-энергетического комплекса Казахстана / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // Науч. вестн. ВГАСУ. Воронеж, 2012. № 3(27). С. 66–74.

16. Исакулов, Б.Р. Ресурсосберегающие технологии получения арболита на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов Азии и Африки / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив, Сара Галебуй // Механизация строительства М., 2013. №3 (825). С. 14-17.

17. Исследование характера и механизма разрушения легких поризованных арболито-бетонов на основе отходов промышленности и растительного сырья / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // Строительные материалы, М., 2012, №12, С. 6-12.

18. Исакулов, Б.Р. Ресурсосберегающие технологии получения и исследования свойств арболита на основе серосодержащих вяжущих / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // Науч. вестн. ВГАСУ. Воронеж, 2013. № 1(29). С. 32–41.

19. Исакулов, Б.Р. Комплексная электромеханическая активация золошлаковых вяжущих для получения легких арболитобетонов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов, М.Д. Джумабаев, А.М. Сартова. // Науч.-техн. вестн. Поволжья. Казань, 2014. № 1. С. 45–49.

Монографии и патенты:

20. Исакулов, Б.Р. Прочность и деформативность поризованного арболита / Б.Р. Исакулов. Актобе, 2007. 132 с. ISBN 9965-02-066-3

21. Исакулов, Б.Р. Легкие бетоны на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов Казахстана и Средней Азии / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив. Актобе, 2011. 350 с. ISBN 9965-13-916-3

22. Исакулов, Б.Р. Коагуляционная очистка вод с утилизацией отходов в виде строительных материалов / Исакулов, Б.Р., Сарсенов А.М. Сарсенова М.А. // Инновационный патент РК на изобретение от 25. 12. 2012, регистр. №26592, Астана, 2012.

23. Исакулов, Б.Р. Способ изготовления арболитовых изделий с получением на их поверхности основы для штукатурки / Исакулов Б.Р., Акулова М.В., Федосов С.В., Щепочкина Ю.А. // Патент на изобретение Российской Федераций от 28 марта 2014 г. № 2517308, Москва, 2014.

Статьи в журналах, сборниках и другие публикации:

24. Исакулов, Б.Р. Применение промышленных отходов в строительстве / Б.Р. Исакулов, Н. Балкиязулы, Х.Т. Абдуллаев // Вестн. Каракалпак. отд-ния Акад. наук республики Узбекистан. 2005. № 2(201). С. 33–34.

25. Исакулов, Б.Р. Методика исследований прочностных характеристик поризованного арболита / Б.Р. Исакулов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. “Патриотизм, гуманизм и толерантность – основные направления политики Казахстана”. Актобе, 2008. С. 162–163.

26. Исакулов, Б.Р. Поризованный арболит на основе отходов промышленности и сельского хозяйства / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив, Ю.В. Жив // Вестн. Актюбин. ун-та “Дуние”// Вестн. Актюб. ун-та “Дуние”. Актобе, 2009. С. 63–73.

27. Исакулов, Б.Р. Использование отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов для производства строительных материалов / Б.Р. Исакулов // Вестн. Актюб. ун-та “Дуние”. Актобе, 2009. С. 58–63.

28. Исакулов, Б.Р. Концепция ресурсосбережения в строительстве / Б.Р. Исакулов // Сб. науч. тр. 18-й науч.-техн. конф. Ташкент. архит.-строит. ин-та. Ташкент, 2009. С. 90–91.

29. Исакулов, Б.Р. Подбор состава и исследования свойств бетона с добавками золы-уноса и пластификатора / Б.Р. Исакулов // Проблемы архитектуры и строительства. Самарканд, 2009. С. 46–48.

30. Исакулов, Б.Р. Анализ современного состояния использования отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов в строительной индустрии / Б.Р. Исакулов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. “Научно-технический прогресс: техника, технологии и образование”. Актобе, 2010. С. 189–191.

31. Isakulov, B.R. Light concrete on the base of industrial and agricultural wastage / B.R. Isakulov, A.S. Zhiv, Yu.A. Zhiv, A.S. Strelnikova // Second international Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. June 28 – June 30 2010 // University Polytechnics Della Marche. Ancona, Italy, 2010. С. 37–44.

32. Исакулов, Б.Р. Современные тенденции использования в строительстве органических отходов деревообрабатывающей отрасли и агропромышленного комплекса / Б.Р. Исакулов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. “Научно-технический прогресс: техника, технологии и образование”. Актобе, 2010. С. 191–194.

33. Исакулов, Б.Р. Исследование шлакощелочных арболитов на основе отходов промышленности и сельского хозяйства / Б.Р. Исакулов // Материалы II всеросс. науч.-практ. конф. “Новые технологии в промышленности, науке и образовании”. Оренбург, 2010. С. 43–47.

34. Исакулов, Б.Р. Применение отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов для производства строительных материалов / Б.Р. Исакулов // Материалы VI междунар. науч.-практ. конф. “Итоги строительной науки”. Владимир, 2010. С. 20–27.

35. Исакулов Б.Р. Влияния расхода и последовательности перемешивания компонентов арболитовой смеси на свойства арболита / Б.Р. Исакулов // Поиск: науч.-техн. журн. Алматы, 2010. № 4 (2). С. 131–136.

36. Исакулов, Б.Р. Разработка рецептур, технология получения и исследование свойств гипсоцементнопуццолановых вяжущих / Б.Р. Исакулов // Поиск: науч.-техн. журн. Алматы, 2010. № 4 (2). С. 241–245.

37. Исакулов, Б.Р. Исследование физико-механических свойств поризованных легких бетонов на основе промышленности и сельского хозяйства республик Средней Азии и Казахстана / Б.Р. Исакулов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Инновации и образовательные технологии». Актобе, 2011. С. 82 – 86 .

38. Исакулов Б.Р. Взаимная нейтрализация токсичных промышленных отходов для получения легких бетонов / Б.Р. Исакулов // *Материалы науч. тр. Владимир.гос. ун-та. Владимир*, 2011.С. 87 – 94.

39. Исакулов, Б.Р. Экспериментальные исследование свойств шлакощелочныхвяжущих на основе отходов промышленности Западного Казахстана / Б.Р. Исакулов // *Поиск: науч.-техн. журн. Алматы*, 2011. № 1. С. 121–127.

40. Исакулов, Б.Р. Использование токсичных промышленных отходов Казахстана для получения легких бетонов/ Б.Р. Исакулов // *Поиск: науч.-техн. журн. Алматы*, 2011. № 1. С. 127–133.

41. Исакулов, Б.Р. Исследование свойств арболита на основе серосодержащих вяжущих / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // *Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. «Найновите научни постижения - 2012»*. София, 2012. С. 92–98.

42. Исакулов, Б.Р. Исследование свойств шлакощелочных вяжущих на основе промышленных отходов Казахстана/ Б.Р. Исакулов, М.Д. Джумабаев, У.К. Акишев, А.М. Сартова// *Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. «Naukowaprzestrzeneuropu - 2012»*. Przemysl, 2012. С. 58–64.

43. Исакулов, Б.Р. Вертикальные несущие и ограждающие конструкций из серосодержащего арболита для стен малоэтажных и многоэтажных зданий / Б.Р. Исакулов, М.Д. Джумабаев, У.К. Акишев, А.М. Сартова// *Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. «Vedeckypokroknaprelomutysyachalety» - 2012*. Praha, 2012. С. 64 – 69.

44. Исакулов, Б.Р. Электромеханическая активация золошламовых вяжущих для получения легких бетонов / Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б., Джумабаев М.Д., Сартова А.М. // *материалы Международной научно-практической конференции «Новейшие достижения науки-2013»*, София, 2013, С. 72-77.

45. Исакулов, Б.Р. Производства строительных материалов на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов Западного Казахстана / Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б., Джумабаев М.Д., Сартова А.М. // *Материалы Международной научно-практической конференции «Новейшие достижения науки-2013»*, София, 2013, стр. 77-82.

46. Исакулов, Б.Р. Исследование свойств вяжущих на основе отходов нефтегазовой промышленности Казахстана / Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б., Джумабаев М.Д., Сартова А.М. // *материалы Международной научно-практической конференции «Дни науки-2013»*, Прага, 2013, стр. 78-83.

47. Исакулов, Б.Р. Разработка и исследование свойств вяжущих на основе отходов промышленности/ Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Джумабаев М.Д., Сартова А.М. // *Вестник Российской академий архитектурно строительных наук*, Курск-Воронеж, 2013, С. 256-260.

48. Исакулов, Б.Р. Повышение физико-механических свойств арболита путем пропитки / Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Джумабаев М.Д., Сартова А.М. // *материалы круглого стола посвященного научной школе академика РААСН, доктора технических наук, профессора С.В. Федосова, Ивановского государственного политехнического университета, Иваново*, 2013, С. 54- 57.

49. Исакулов Б.Р. Исследование свойств щелочного вяжущего на основе высококальциевой золы-уноса /Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Джумабаев М.Д., Сартова А.М.// *Информационная среда вуза: Мат-лыXX Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: ИГАСУ*, 2013. - С. 219 – 221.

50. Исакулов Б.Р. Нейтрализация токсичных отходов для получения вяжущих при производстве строительных материалов/ Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Имангазин Б.А // *Информационная среда вуза: Мат-лы XX Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: ИГАСУ*, 2013. - С. 233 – 235.

51. Исакулов Б.Р. Взаимная нейтрализация токсичных промышленных отходов для получения легких бетонов / Б.Р. Исакулов // *Материалы науч. тр. Владимир. гос. ун-та. Владимир*, 2011. С. 87 – 94.
52. Исакулов Б. Р. Экспериментальные исследования свойств шлакощелочных вяжущих на основе отходов промышленности Западного Казахстана / Б.Р. Исакулов // *Вестн. Актюб. ун-та им. С. Байшева. Актюбе*, 2011. №4 (34). С. 67–71.
53. Исакулов, Б.Р. Легкие бетоны на основе золошламовых вяжущих улучшенных методом электромеханической активации / Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б. // *Вестник казахско-русского международного университета. – Актюбе: КРМУ*, 2013. - Выпуск 2(3), - С. 42-46.
54. Исакулов Б.Р. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов/ Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б // *Вестник казахско-русского международного университета. – Актюбе: КРМУ*, 2013. - Выпуск 2(3), - С. 46-52.
55. Исакулов Б.Р. Подбор оптимального состава и изучение характера механизма разрушения шлакощелочного арболита/ Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б // *Вестник казахско-русского международного университета. – Актюбе: КРМУ*, 2013. - Выпуск 2(3), - С. 52-59.
56. Исакулов Б.Р. Исследование состава и механизма разрушения легкого бетона на основе различных органических и неорганических отходов/ Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б // *Индустриально-инновационное развитие транспортно-коммуникационного комплекса Казахстана: Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. – Алматы: КазАТК*, 2013. - С. 298 – 304.
57. Исакулов Б.Р. Активация и детоксикация промышленных отходов для получения бетонов/ Федосов С.В., Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Тукашев Ж.Б. // *Индустриально-инновационное развитие транспортно-коммуникационного комплекса Казахстана: Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. – Алматы: КазАТК*, 2013. - С. 304 – 309.
58. Исакулов, Б.Р. Формирование прочности поризованного арболита и механизм его деформаций и разрушения / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // *Сб. ст. 6-й междунар. науч.-техн. конф. Иваново*, 1999. С. 162–164.
59. Исакулов, Б.Р. О некоторых особенностях прочностных и деформативных свойств поризованных легких бетонов / Б.Р. Исакулов, Р.Н. Ешниязов, А.А. Отеулиев // *Вестн. Каракалпак. отд-ния Акад. наук республики Узбекистан*. 1999. № 4–5. С. 45–46.
60. Исакулов, Б.Р. Экспериментальные исследования ползучести поризованного арболита при различных сжимающих напряжениях / А.С. Жив, Б.Р. Исакулов // *Вест. Каракалпак. отд-ния Акад. наук республики Узбекистан*. 1999. № 6. С. 82–83.
61. Isakulov, B.R. Imparting strength to foam fibrous concrete containing organic concrete / B.R. Isakulov // *Материалы 25-й конф. “Our world in Concrete and Structures”. Singapore*, 2000. С. 77 – 82.