

На правах рукописи



Хеирбеков Руслан Азерович

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ПОРИЗОВАННЫЙ АРБОЛИТ НА ОСНОВЕ
ШЛАКОСИЛИКАТНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель:

Самченко Светлана Васильевна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Козлова Валентина Кузьминична
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», кафедра «Строительные материалы и автомобильные дороги», профессор

Горленко Николай Петрович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО "Томский государственный архитектурно-строительный университет", кафедра физики, химии и теоретической механики, профессор

Ведущая организация:


ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита состоится « 22 » декабря 2023 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 Студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru .

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.339.01



(подпись)

Иноземцев Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С начала 21-го столетия наблюдается интенсивный рост строительства жилых и общественных зданий различного назначения в том числе и в частном домостроении. При возведении зданий и сооружений возникает необходимость в применении энергоэффективных и в то же время прочных строительных материалов с низкой себестоимостью. Эти и другие требования обуславливают рост исследований и разработок строительных материалов с высокими физико-механическими и строительно-техническими свойствами.

В этой связи, большую популярность набирают строительные блоки из легкого ячеистого бетона неавтоклавного твердения марок по плотности D 600-D 700. Одновременно растет спрос на экологически чистые блоки из арболита, обладающие рядом положительных качеств, таких как экологичность и высокая прочность при невысокой средней плотности. Между тем возникает острая необходимость ресурсо- и импортозамещения. В частности, набирает популярность тенденция к использованию бесцементных вяжущих веществ, полученных на основе промышленных отходов. Кроме высоких физико-механических показателей, такие вяжущие используются в производстве попутных и улучшают экологическую обстановку в районе действия предприятий.

Наиболее перспективным решением при производстве высокоэффективных строительных ячеистых легковесных композитов является использование отходов промышленных предприятий металлургической (доменный гранулированный шлак) и деревообрабатывающей (щепа различных пород древесины) отрасли. Однако производство ячеистого бетона неавтоклавного твердения марок по плотности D600-D700 в современных реалиях затруднено, в связи с отсутствием знаний о совместном использовании бесцементных вяжущих веществ с отходами деревообрабатывающей промышленности, о механизмах формирования прочной структуры при получении легкого ячеистого бетона неавтоклавного твердения на их основе

Научная квалификационная работа выполнялась в рамках государственной программы Российской Федерации "Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации", утвержденная Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2017 г. № 1710, а также в рамках Национального проекта «Жильё и городская среда».

Степень разработанности темы. Исследования вяжущих щелочной активации проведенные в различными научными группами в России, США, Китае и Великобритании, подтверждают перспективность использования отходов металлургической промышленности, а именно доменных гранулированных шлаков в качестве вяжущего для применения его в строительстве при производстве шлакосиликатных растворов и бетонов.

Отходы деревообрабатывающей промышленности нашли свое применение при производстве изделий из арболита. Растущий интерес к этому виду бетонов объясняется рядом

положительных свойств присущих данному материалу: прочность, экологичность, гвоздимось и т.п. Классический арболит на основе портландцементного вяжущего обладает рядом недостатков, затрудняющих его изготовление. Основной сложностью при производстве классического арболита является трудоёмкий цикл подготовки заполнителя, древесной щепы, который заключается в предварительной выдержке сырья и применении различных химических добавок.

В этой связи интересным и перспективным, является решение по замене вяжущего на основе портландцемента в составе арболита, на шлакосиликатное вяжущее изготовленное с применением доменного гранулированного шлака. Кроме того, улучшение структуры такого вида бетонов за счет введения технической пены до настоящего момента изучен слабо. Поэтому, получение шлакосиликатных поризованных арболитов на основе синтеза композиций с применением отходов промышленности: доменного гранулированного шлака и древесной щепы хвойных пород, а также технической пены с оптимальными параметрами качества является актуальной и перспективной задачей и требует досконального научного исследования с целью получения высокоэффективного и долговечного экологически чистых ячеистых легковесных композитов.

Научная гипотеза. Создание конструкционно-теплоизоляционного поризованного арболита высокого качества может быть достигнуто при использовании шлакощелочного вяжущего, на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака и жидкого стекла, а также щепы хвойных пород древесины, что обеспечит формирование его повышенной прочности, а использование технической пены стабилизированной бентонитовой глиной позволит поддерживать ячеистую структуру и необходимую плотность материала.

Цель работы: установление закономерностей формирования структуры поризованного шлакосиликатного композита на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака и раствора натриевого жидкого стекла в качестве затворителя, щепы из хвойных пород древесины и технической пены, для получения арболита с маркой по плотности не ниже D600 и повышенными показателями эксплуатационных свойств.

Задачи работы:

- Обосновать выбор компонентов доменного гранулированного шлака, древесной щепы и бентонитовой глины, обеспечивающих максимальные показатели эксплуатационных свойств арболитового композита;

- Изучить влияние вида и количества пенообразующей добавки на свойства арболитового композита для создания облегченных изделий, и поиск путей повышения физико-механических характеристик пены, позволяющих получить техническую пену с оптимальными параметрами качества;

- Разработать оптимальные составы поризованного шлакосиликатного арболитового материала с применением математического анализа;

- Изучить физико-механических характеристик поризованного шлакосиликатного арболитового композита и установить зависимости, описывающие основные параметры его качества;
- Изучить закономерности формирования структуры шлакосиликатного поризованного арболита современными методами анализа;
- Провести опытно-промышленные испытания и разработать рекомендации по получению композиционного материала на основе отходов промышленных предприятий металлургической и деревообрабатывающей отраслей.

Объектом исследования является конструкционно-теплоизоляционный поризованный арболит основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака и жидкого стекла, а также щепы хвойных пород древесины и технической пены стабилизированной бентонитовой глиной.

Предметом исследования является установление закономерностей формирования структуры поризованного шлакосиликатного арболитового композита с повышенными показателями эксплуатационных свойств.

Научная новизна работы.

Разработан конструкционно-теплоизоляционный поризованный арболит высокого качества на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака, жидкого стекла, щепы хвойных пород древесины и технической пены с оптимальными параметрами качества. Показано, что доменный гранулированный шлак, содержащий 85% и более аморфной фазы с дисперсностью не менее 500 м²/кг, а также модифицированное жидкое стекло плотностью не менее 1310 кг/м³, щепы хвойных пород древесины, а также техническая пена с оптимальными параметрами качества являются эффективными компонентами для производства конструкционно-теплоизоляционного поризованного арболита высокого качества с маркой по плотности D 600 – D 700.

Установлено, что высокое качество арболита достигается поризацией шлакосиликатной арболитовой смеси синтетическими пенообразующими добавками, стабилизированными тонкомолотой бентонитовой глиной, которая позволяет получать пену с низким водоотделением (28,2%) и высокой кратностью (12,4), а также проникновением в структуру заполнителя шлакощелочного связующего с последующей его кристаллизацией в порах заполнителя, что обуславливает получение водостойкого композита.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что с помощью математического метода двухфакторного композиционного эксперимента, установлено влияние рецептурных факторов на физико-механические характеристики композита из шлакощелочного вяжущего на основе доменного гранулированного шлака, жидкого стекла и древесной щепы хвойных пород. На основании полученных зависимостей, были построены модели, рационально описывающие исследуемую систему, в рамках выбранного факторного пространства.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- показана возможность получения эффективного конструкционно-теплоизоляционного поризованного арболита с применением шлакосиликатных вяжущих веществ, изготовленных на основе отходов металлургической промышленности, а также щепы хвойных пород древесины, отхода производств деревообрабатывающей промышленности, натриевого жидкого стекла и технической пены с оптимальными параметрами качества.

- установлен оптимальный состав технической пены с добавкой модификатором в виде бентонитовой глины в количестве 4% от массы раствора и с концентрацией раствора пенообразователя 3,3%, позволяющий получать техническую пену с высокой кратностью 12,4 и низким водоотделением 28,2%.

- получен арболитовый композиционный материал с маркой по плотности D 600 и прочностью 1,50 МПа, с водопоглощением по массе (W_m) 74,25% и объёму (W_o) 51,38% соответственно, коэффициент размягчения полученного композита (K_p), составил 0,63, при этом коэффициент теплопроводности для образца со средней плотностью 600 кг/м³ составил 0,081 Вт/(м·°С), а модуль упругости – 1,69 ГПа.

- установлено положительное влияние ТВО при температурах 80°С и 90°С и длительностью изотермической выдержки от 6 до 12 часов на структуру и свойства шлакосиликатного поризованного арболита. Показано, что оптимальные физико-механические характеристики достигаются при температуре 80°С и времени изотермической выдержки 10 часов. При этом повышение температуры изотермической выдержки на 10°С (до 90°С) ведет к сокращению времени изотермической выдержки с 10 до 8 часов, при повышении показателей прочности.

- разработаны рекомендации по изготовлению поризованного арболитового материала и применению его в строительстве и проведены опытно-промышленные испытания разработанного шлакосиликатного поризованного арболита базе департамента технического развития исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы».

- создан эффективный конструкционно-теплоизоляционный поризованный арболит как с точки зрения применения техногенных отходов промышленности и возможности полностью отказаться от дорогостоящего портландцемента заменив его вяжущим на основе доменного гранулированного шлака, так и снижения затрат на его изготовление, за счет сокращения производственного цикла, исключив из него операции по подготовке заполнителя, разработанный материал и технология его изготовления также позволит значительно улучшить экологическую обстановку в районе действия предприятий.

Методология и методы исследования

Исследования проводились с использованием системных методов анализа, на основе актуальных нормативных документов действующих на территории Российской Федерации. В работе

по исследованию структуры и свойств материалов использовалось современное поверенное исследовательское оборудование. Для оценки структурных характеристик шлакосиликатного поризованного арболита применялись физико-химические методы анализа, такие как рентгенофазовый, электронно-микроскопический, дифференциально-термический и инфракрасная микроскопия.

Главной методологической базой работы послужили основы строительного материаловедения, а также статистические методы исследования и методы математического планирования эксперимента.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается аналитическими и экспериментальными исследованиями, которые проводились с использованием сертифицированных и метрологически поверенных лабораторных приборов и установок, а также с применением актуальных и современных физико-химических методов анализа. Для определения свойств разработанного шлакосиликатного поризованного арболита использовано большое число методов, указанных в действующих нормативных документах. Заключение и основные выводы по работе, сделанные на основании данных, полученных различными методами, не противоречат общепризнанным положениям и дополняют опубликованные данные других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснованный выбор компонентов, обеспечивающих максимальные показатели эксплуатационных свойств арболитового композита на основе доменного гранулированного шлака, древесной щепы и бентонитовой глины;

- результаты исследований влияния вида и количества пенообразующей добавки на свойства арболитового композита для создания облегченных изделий, и пути повышения физико-механических характеристик пены, позволяющих получить техническую пену с оптимальными параметрами качества;

- оптимальный состав поризованного шлакосиликатного арболита и математические модели зависимости физико-механических характеристик смесей от их состава;

- физико-механические характеристики полученного композита и установленные зависимости, описывающие основные параметры качества шлакосиликатного поризованного арболита;

- результаты исследований структурообразования и свойств полученных шлакосиликатных поризованных композиционных арболитовых материалов;

- рекомендации по изготовлению высокоэффективных поризованных арболитовых материалов на основе шлакосиликатных вяжущих веществ и результаты-опытно промышленных испытаний.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, разработке программы и выборе методов исследований, в анализе исследований отечественных и зарубежных специалистов в области производства арболитовых материалов, в получении, анализе и обобщении экспериментальных исследований закономерностей формирования структуры поризованных арболитовых материалов, установлении оптимального рецептурного состава поризованных арболитовых материалов и разработке технологических параметров его производства, формулировке заключения и основных выводов по диссертационной работе, разработке рекомендаций по изготовлению высокоэффективных поризованных арболитовых материалов на основе шлакосиликатных вяжущих веществ, проведении опытно-промышленных испытаний, участии в конференциях и подготовке статей для публикации.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на международных и всероссийских научных и научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции «Наука и современное общество: взаимодействие и развитие» (Уфа, 15-16 декабря 2019 года); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы строительного материаловедения» (ВСГУТУ, Улан-Удэ, 21-24 июля 2021 года); II Национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» (НИУ МГСУ, Москва, 08 декабря, 2021 года); XXV Международной научной конференции «Construction the Formation of Living Environment (FORM-2022)» (НИУ МГСУ, 20 – 22 апреля, 2022 года); X Международной студенческой научной конференции «Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства» (13 – 14 мая 2022 г., Гродно, Республика Беларусь); Третьей национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования» 19 декабря 2022 г., НИУ МГСУ, г. Москва; а также на ежегодных технических совещаниях исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы.» в период с 2019 по 2022 гг.

Внедрение результатов исследований. Результаты работы реализованы в рамках государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации». Проверка результатов исследований осуществлялась базе департамента технического развития исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы». Получено заключение, что разработанные составы поризованных арболитовых материалов на основе шлакосиликатных вяжущих отвечают требованиям, предъявляемым к этим видам строительных материалов, обладает низкой теплопроводностью, и может применяться в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений индивидуального жилищного строительства и в качестве самонесущих стен и перегородок.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 9 научных публикациях, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых

научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в международной реферативной базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 137 страницах машинописного текста, состоит из введения, основной части, включающей 5 глав, заключения, списка литературы из 150 наименований и 2 приложений, содержит 36 рисунков, 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Высокие объемы производства строительной продукции, спровоцировали рост количества промышленных отходов в районе действия предприятий. Добыча полезных ископаемых для строительной отрасли ведёт к истощению природных ресурсов. В этой связи, на первый план выходят задачи по пересмотру технологий производства и потребления строительной продукции. Одним из наиболее эффективных вариантов решения данной задачи, является использование крупнотоннажных отходов промышленности как альтернатива широко используемого портландцемента, а также найти применение отходам деревообрабатывающей промышленности для получения эффективного арболитового композита. Для этого необходимо разработать рецептуры композиционного материала, изучить физико-химические закономерности формирования его структуры и установить условия получения поризованного шлакосиликатного арболитового композита. На основании результатов анализа научной литературы была сформулирована научная гипотеза, определены цель и задачи исследования.

В работе использовались следующие материалы: молотый доменный гранулированный шлак, натриевое жидкое стекло, щепа хвойных пород древесины, концентрированные растворы пенообразователей и бентонитовая глина.

Исследования проведены с использованием различных методов анализа, включающих: РФА, РЭМ, химический, гранулометрический и ДТА. Физико-механические свойства композиционного арболитового материала производились в соответствии с ГОСТ 310.3–76, ГОСТ 19222–2019, ГОСТ 310.4–81 и ГОСТ 25485–2019.

Тепловлажностная обработка образцов (ТВО) проводилась при нормальном атмосферном давлении в камере непрерывного действия при температуре изотермического прогрева равной 80°C и 90°C, а также временем изотермической выдержки равном: 6, 8, 10, 12 часов. Скорость подъема и снижения температуры в камере находилась на уровне 40–45 °C/час.

Разработка составов поризованных шлакосиликатных арболитовых материалов.

Получение технической пены с оптимальными параметрами качества, а также оптимизация её состава проводились путем применения добавок стабилизаторов (бентонитовой глины, гумата натрия и жидкого стекла). В качестве показателей качества пены оценивались её

кратность и устойчивость во времени. По результатам экспериментов были построены графики зависимости кратности пены от процентного содержания добавки стабилизатора рис. 1 и зависимость выделения воды из пены от процентного содержания добавки стабилизатора рис. 2.

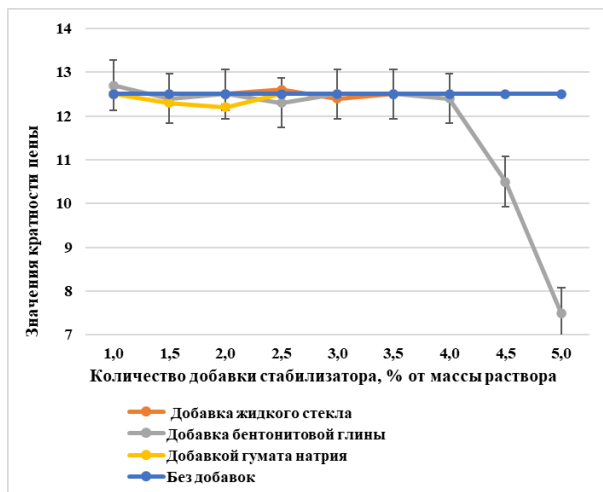


Рисунок 1 – Зависимость кратности пены от процентного содержания добавки стабилизатора

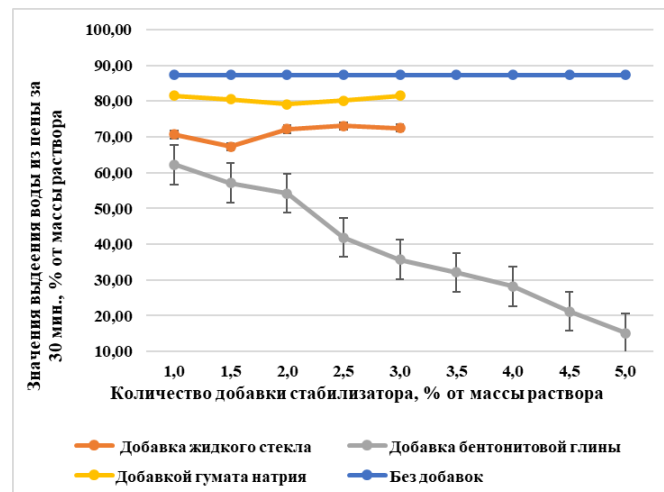


Рисунок 2 – Зависимость выделения воды из пены от процентного содержания добавки стабилизатора

Установлено, что пена, полученная на основе пептидных пенообразователей, в резкощелочной среде, создаваемой в системе шлак-жидкое стекло разрушается, делая невозможным применение пены, полученной на основе белковых пенообразователей в таких системах.

Установлена оптимальная концентрация раствора синтетического пенообразователя (3,3%), позволяющая получать пену с высокой кратностью. Показано, что бентонитовая глина является эффективной добавкой стабилизатором для пены. При введении в количестве равном 4% от массы раствора, добавка положительно влияет на устойчивость пены, снижая водоотделение до значения в 28, 2%, не снижая при этом кратность пены, которая составляет 12,4.

Кинетика процессов формирования структуры композиционного поризованного арболита. Для оценки влияния концентрированного раствора пенообразователя на свойства твердеющего шлакосиликатного поризованного арболита, был произведен анализ кинетики гидратации вяжущего материала в присутствии раствора ПАВ. При этом за эталон был взят образец содержащий доменный шлак и жидкое стекло, в то время как исследуемый образец помимо шлака и жидкого стекла содержал раствор ПАВ. В результате испытаний было выяснено (рис. 3), что для обоих образцов фаза быстрых реакций, начинающаяся сразу после затворения минеральных компонентов жидкой фазой, характеризуется интенсивным тепловыделением с характерным пиком примерно через 9 минут от момента начала реакции с последующим снижением интенсивности тепловыделения и переходом к индукционному периоду реакции. Через 2 и 110 часов наблюдаются пики тепловыделения для контрольного образца и через 2 и 128 часов для образца

с пенообразователем. За весь период наблюдения (от 3 мин до 240 часов) суммарная тепловая энергия, выделившаяся для контрольного образца, составила 105,48 Дж/г, для образца с пенообразователем – 104,16 Дж/г. Снижение тепловой энергии и кинетики гидратации для образца с пенообразователем относительно контрольного может быть вызвано адсорбционным действием молекул ПАВ присутствующих в растворе пенообразователя.

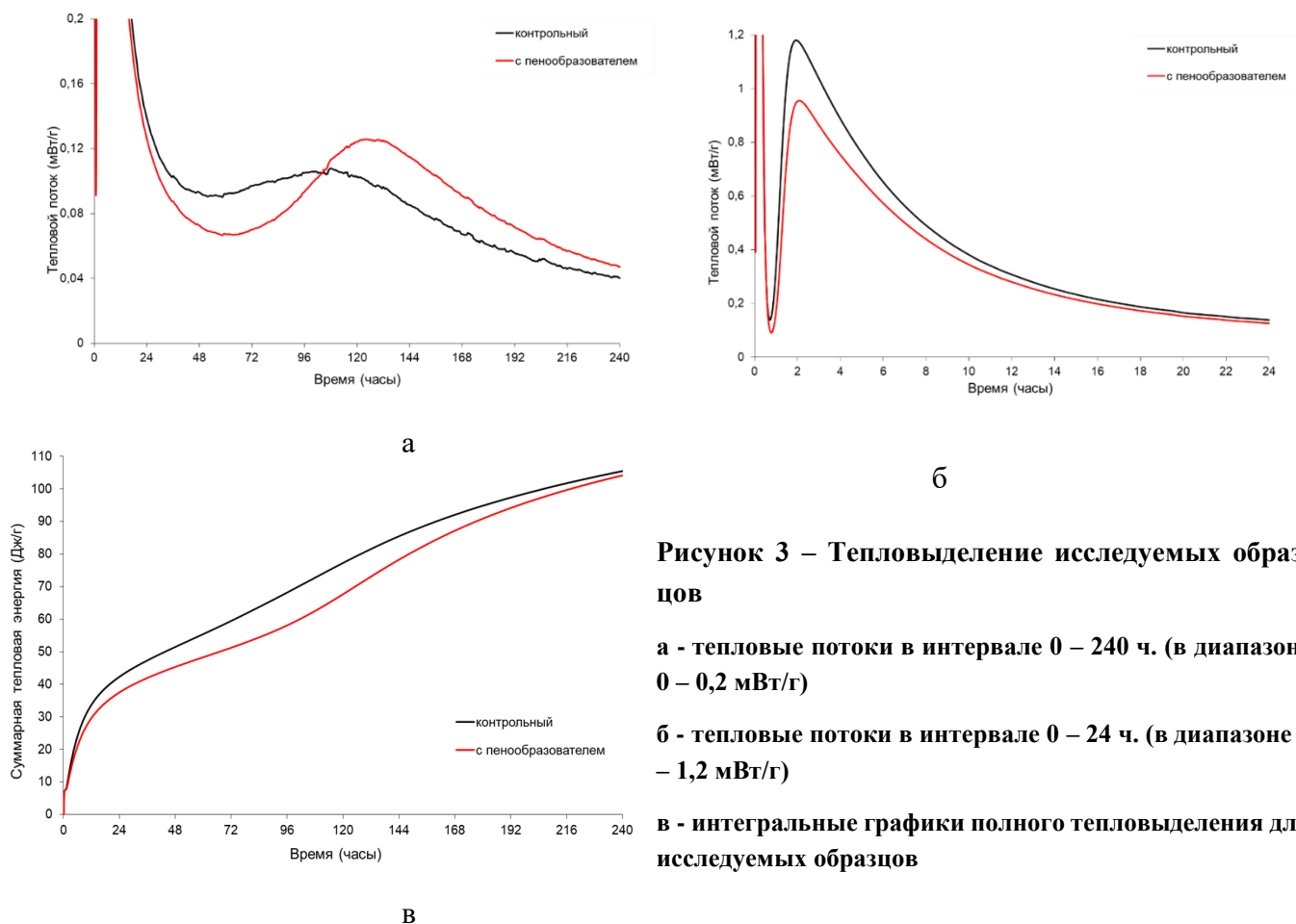


Рисунок 3 – Тепловыделение исследуемых образцов

а - тепловые потоки в интервале 0 – 240 ч. (в диапазоне 0 – 0,2 мВт/г)

б - тепловые потоки в интервале 0 – 24 ч. (в диапазоне 0 – 1,2 мВт/г)

в - интегральные графики полного тепловыделения для исследуемых образцов

Влияние компонентов арболитовых композиционных материалов на плотность изделий. Был произведен подбор состава арболита плотностью 600 кг/м^3 с оптимальными значениями соотношения затворитель/шлак, позволяющей получать композит с высокими строительно-техническими свойствами. Далее на основе полученных данных, расчётно-экспериментальным путем был произведен подбор оптимального состава поризованного шлакосиликатного арболита с маркой по плотности D600.

Установлено влияние рецептурных факторов: расхода, вяжущего и древесной щепы на физико-механические характеристики композита. Полученные экспериментальные данные использовались для разработки математической модели, которая представляет собой функцию отклика,

связывающую факторы X_1 и X_2 с параметрами выходных данных. В данном случае функция отклика (уравнение 1) выражается полиномом второй степени.

$$(X_1, X_2) = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_{11} * X_1^2 + b_{22} * X_2^2 + b_{12} * X_1 * X_2 \quad (1)$$

На основании полученных моделей были построены графики зависимости прочности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода основных компонентов смеси. На рис. 4 и 5 представлены, соответственно, зависимости прочности и плотности от расхода компонентов смеси.

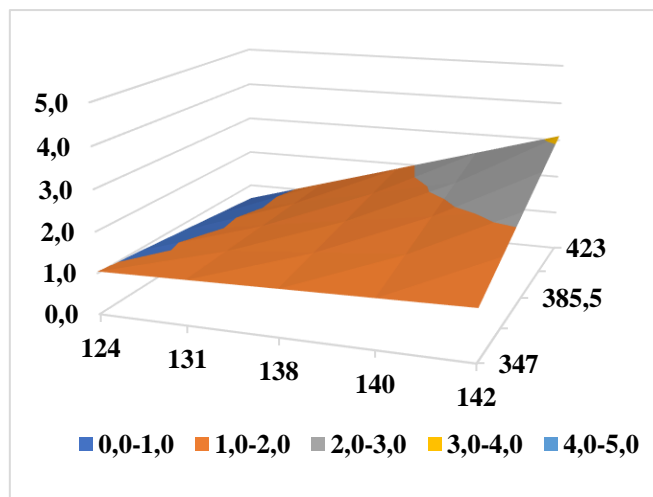


Рисунок 4 – Зависимость прочности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода компонентов

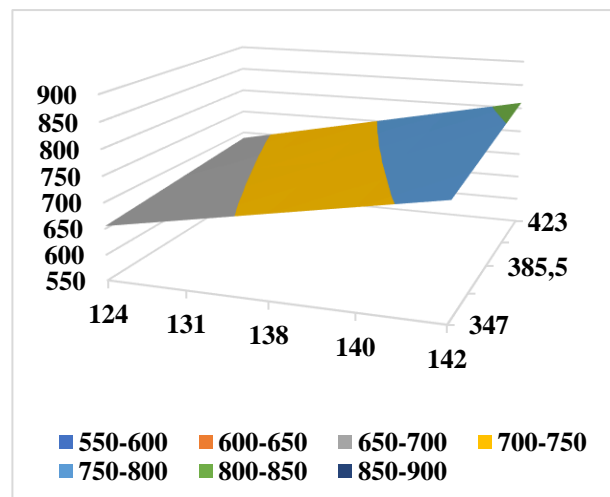


Рисунок 5 – Зависимость плотности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода компонентов

По результатам полученных зависимостей были построены модели, рационально описывающие исследуемую систему, в рамках выбранного факторного пространства. Установлено, что на повышение прочности и коэффициента конструктивного качества влияет, в основном, количество вяжущего и в меньшей степени количество заполнителя. В то же время на изменение показателей плотность в большей степени влияет количество шлака и в меньшей степени количество щепы, а также сочетание этих двух факторов.

Изучение структуры арболитовых материалов проводилось рентгенофазовым, термогравиметрическим и электронно-микроскопическим анализами. Исследовались образцы шлакосиликатного поризованного арболита твердевшие в естественных условиях в течение 1-х суток и 28 суток, а также образцы подвергшиеся ТВО при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, в течение 12 и 10 часов соответственно.

В результате проведенного РФА анализа образцов отличающихся условиями и длительностью твердения были получены рентгенограммы образцов поризованного композита (рис. 6). Было установлено, что полученный композиционный материал состоит из аморфной и

кристаллической фаз. При этом содержание аморфной фазы в материале, независимо от условий твердения находится на уровне 92%.

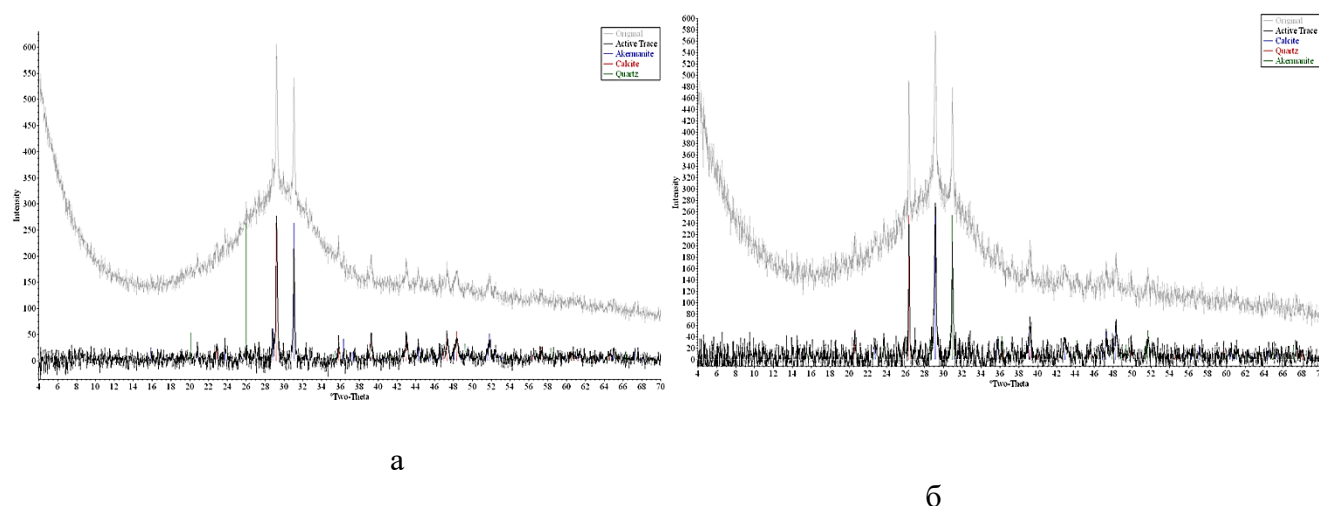


Рисунок 6 – Рентгенограммы образцов шлакосиликатного поризованного арболита
а - после ТВО при 80°C в течение 12 час., б - в возрасте 28 суток

Для установления природы новообразований, образующихся в материале при твердении, был проведен ТГА анализ (рис. 7). В результате экспериментов, установлено, что основными новообразованиями присутствующими в образцах являются низкоосновные гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция и натрия, а также тоберморит, гиролит и акерманит. При этом самая высокая интенсивность появления данных новообразований наблюдается в образце, твердевшем в условиях ТВО при 90°C в течение 10 часов.

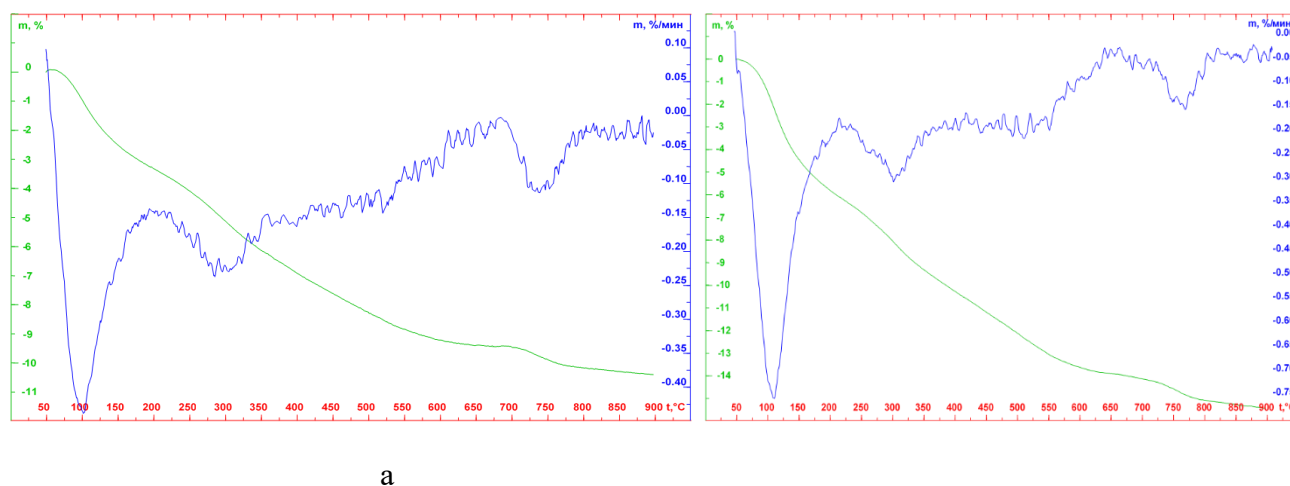


Рисунок 7 – Дериватограммы образцов шлакосиликатного поризованного арболита
а - после ТВО при 90°C в течение 10 час., б - после 28-ми суток твердения

Электронно-микроскопический анализ показал, что структура образцов образована тонкими чешуйчатыми пластинками, относящихся к новообразованиям группы низкоосновных гидросиликатов CSH(B), в том числе акерманита. Также было установлено, что полученная пористая структура (рис. 8), отличается равномерно распределенной пористостью с размерами пор ≥ 1 мкм.

Данная структура имеет замкнутую пористость со сплошными и ровными межпоровыми перегородками, что обуславливает меньшую капиллярность, и, следовательно, пониженное водопоглощение и сорбционное увлажнение. Снимки поверхности в зоне контакта заполнитель вяжущее (рис. 9), а также данные, полученные в результате энергодисперсионного (рис. 10) и химического (табл. 1) анализов зоны контакта заполнитель-вяжущее позволяют выдвинуть предположение, что на поверхности древесины происходит появление новообразований схожей природы, что и в самом шлакосиликатном камне.

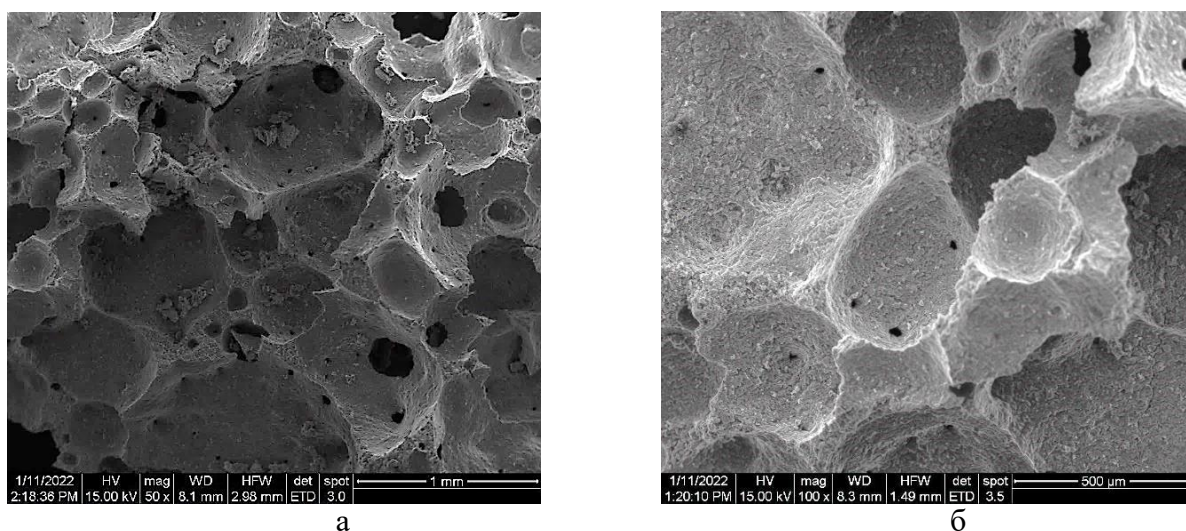


Рисунок 8 – Микрофотографии поровой структуры композита

а – увеличение (x50), б – увеличение (x100)

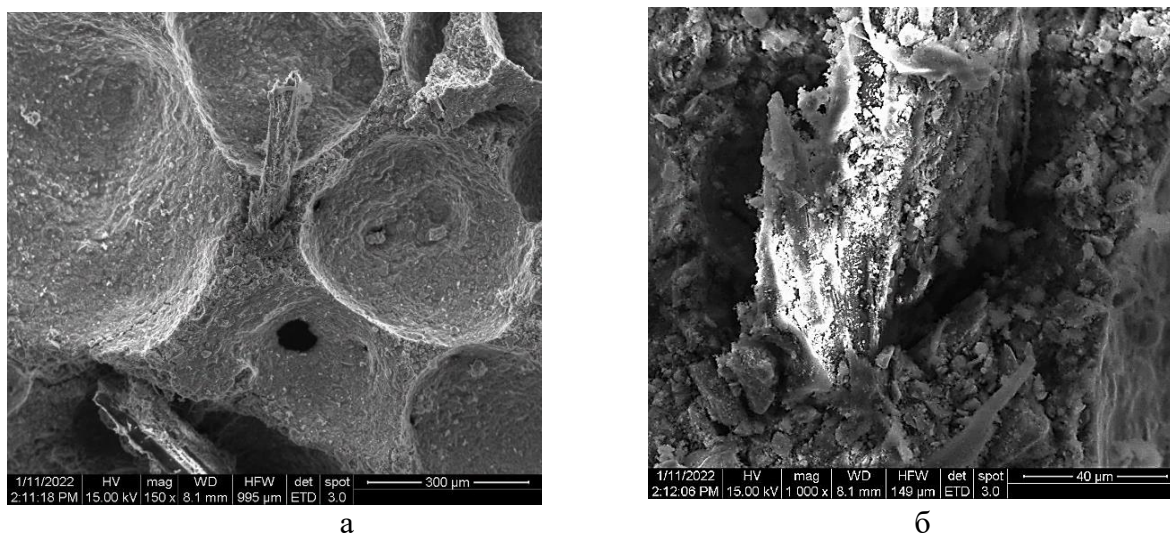


Рисунок 9 – Микрофотография контактной зоны заполнитель-вяжущее

а – увеличение (x150), б – увеличение (x1000)

Проведенный энергодисперсионный анализ зоны контакта заполнитель-вяжущее и выполненный на его основе химический анализ контактной зоны показывает, что среди продуктов гидратации шлакосиликатного вяжущего в данной зоне присутствуют низкоосновные гидросиликаты и гидроалюмосиликаты различного состава группы CSH(B).

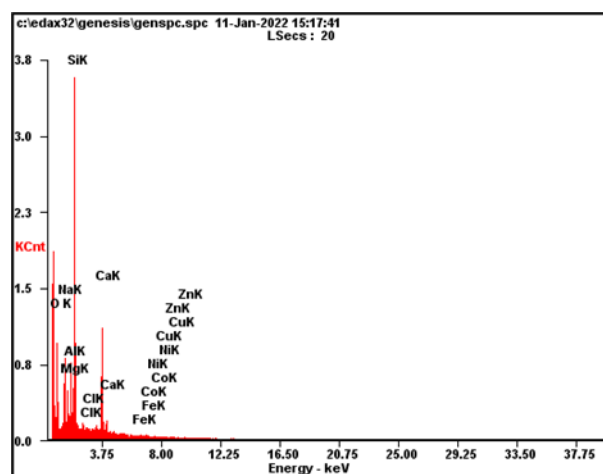
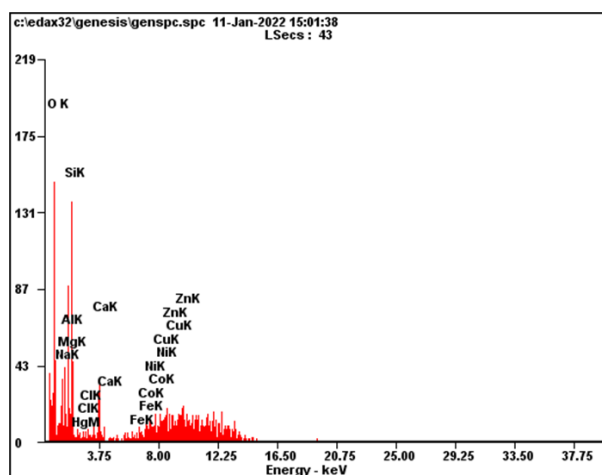


Таблица 1 – Химический анализ зоны контакта заполнитель-вяжущее

Na₂O	9,08
MgO	6,95
Al₂O₃	14,36
SiO₂	30,34
CaO	8,94
Fe₂O₃	0,76
CoO	1,84
NiO	3,52
CuO	7,97
ZnO	14,89

Рисунок 10 – Энергодисперсионный анализ

а - продуктов гидратации композиционного шлакосиликатного поризованного арболитобетона

б - зоны контакта заполнитель-вяжущее

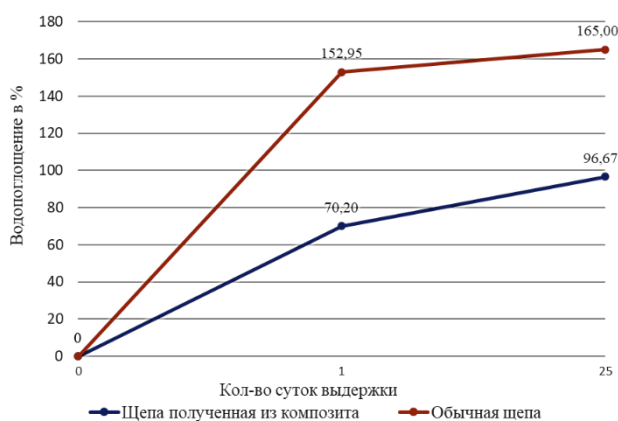


Рисунок 11 – Водопоглощение древесины

Следовательно щелочные компоненты вяжущего выступают в роли минерализатора для древесины, что повысит её водостойкость и огнестойкость. Проведенные испытания водопоглощения не обработанной древесной щепы и её аналога полученного из поризованного композита изготовленного на основе шлакосиликатного вяжущего, подтверждают данное положение. График водопоглощения древесной щепы в естественном состо-

янии (кривая 1) и щепы полученной из поризованного композита изготовленного на основе шлакосиликатного вяжущего (кривая 2) представлен на рис. 11. Было установлено, что водопоглощение последнего образца снижается вплоть до 68% по сравнению с первым образцом.

Изучение свойств поризованного арболитового композита проводилось определением его основных физико-механические характеристики (прочность и плотность в естественном и сухом состояниях). Результаты испытаний образцов композита представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства арболитового материала

Наименование за-меса	Расход шлака, кг/м ³	Расход щепы, кг/м ³	Расход жидкого стекла, кг/м ³	Затворитель/Шлак	Плотность образцов, кг/м ³		Влажность, %	R _{изг} , МПа
					Состояние			
					Сухое	Естест.		
S1	360	168	210	0,58	609	737	21,1	1,68
S2	360	168	231	0,64	612	743	21,5	1,66
S3	360	168	189	0,52	605	730	20,7	1,92

По результатам испытаний были построены зависимости показателя прочности композита от отношения затворитель/шлак (рис. 12) и зависимость прочности полученного арболитового материала от его плотности (рис. 13)

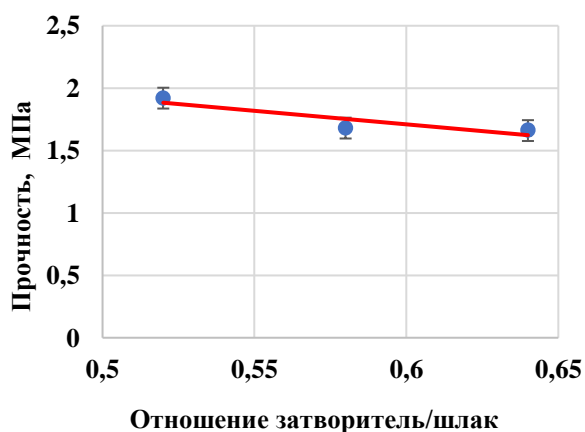


Рисунок 12 – Зависимость прочности полученного композита от отношения затворитель/шлак

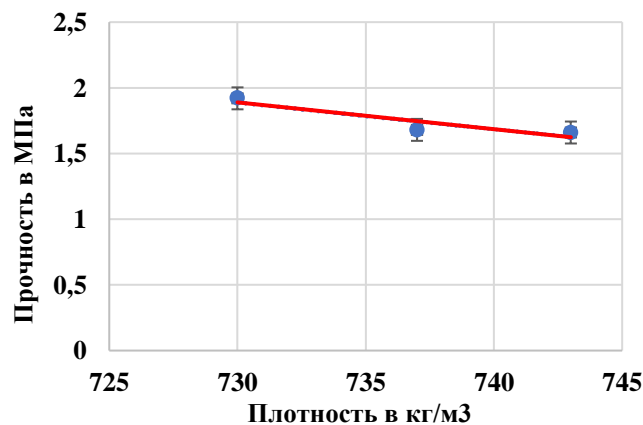


Рисунок 13 – Зависимость прочности полученного композита от его плотности

Как видно из представленных результатов, плотность композита и соотношение между затворителем и шлаком оказывают значимое влияние на прочностные характеристики композиционного арболитового материала. Согласно полученным данным прочность композита увеличивается (на 0,26 МПа) с уменьшением его плотности и содержания раствора жидкого стекла. Понижение механической прочности исследуемых образцов из шлакосиликатного арболита при увеличении количества жидкого стекла может быть связано с увеличением пористости материала.

Самые высокие показатели прочности (1,92 МПа) наблюдается при соотношении затворитель/шлак – 0,52. При этом дальнейшее уменьшение содержания жидкого стекла в составе арболита приводит к нарушению удобоукладываемости смеси и ее недоуплотнению. Для достижения необходимой текучести смеси до введения в неё технической пены, и получения композита с высокими физико-механическими характеристиками необходимое растворо-шлаковое отношение должно находиться на уровне 0,7.

Водопоглощение композиционного арболитового материала. Для полученного состава с маркой по плотности D600 были определены показатели водопоглощения по массе (W_m) и объёму (W_o) композита. Значения которых находятся на уровне 74,25% и 51,38% соответственно. Установлен объём открытых капиллярных пор бетона равный водопоглощению по объёму образца. Кроме того, установлено значение коэффициента размягчения полученного композита (K_p), равное 0,63.

Теплопроводность шлакосиликатного поризованного арболитового материала. Согласно полученным данным для состава со средней плотностью в сухом состоянии 600 кг/м^3 коэффициент теплопроводности составил $0,081 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Сравнительный анализ технических показателей похожих материалов (таблица 3) показал, что разработанный шлакосиликатный поризованный арболитовый композит имеет более низкие значения.

Таблица 3 – Сравнение теплопроводности различных материалов

Характеристики	Газобетон	Пенобетон	Арболит	Шлакосиликатный поризованный арболит
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*°C)	0,14-0,21	0,24	0,09-0,16	0,081
Плотность, кг/м ³	600-800	700	400-850	600

Низкие показатели теплопроводности по сравнению с основными конкурентами (пенобетон, газобетон, арболит и пр.), при одинаковых значениях средней плотности у разработанного шлакосиликатного поризованного арболитового композита объясняются образованием смешанной аморфно-кристаллической структурой, характеризующийся более низкими значениями теплопроводности относительно материалов с кристаллической структурой.

Модуль упругости и усадка поризованного арболитового композиционного материала. В результате работы получены зависимости значения модуля упругости от плотности образцов шлакосиликатного поризованного арболита (рис. 14).

Полученные зависимости свидетельствуют об увеличении значения модуля упругости при росте средней плотности. Кроме того, по полученным данным было установлено, в зависимости от условий твердения, величина модуля упругости материала не изменяется. Вычисленное

значение модуля упругости для образца поризованного арболита с маркой по средней плотности D600 находится на уровне 1,69 ГПа.

Результаты, полученные при определении усадки при высыхании образцов шлакосиликатного поризованного арболитового материала показали (рис. 15), что в период с (1–13 сутки) идет интенсивное высыхание образцов, которое протекает вплоть до значения деформации равное 0,2%. Однако начиная с 15 суток испытания образец начал активно расширяться и на 31 сутки испытания деформации расширения были на уровне 0,6%. Подобные процессы, возможно, связаны с высокой гигроскопичностью материала.

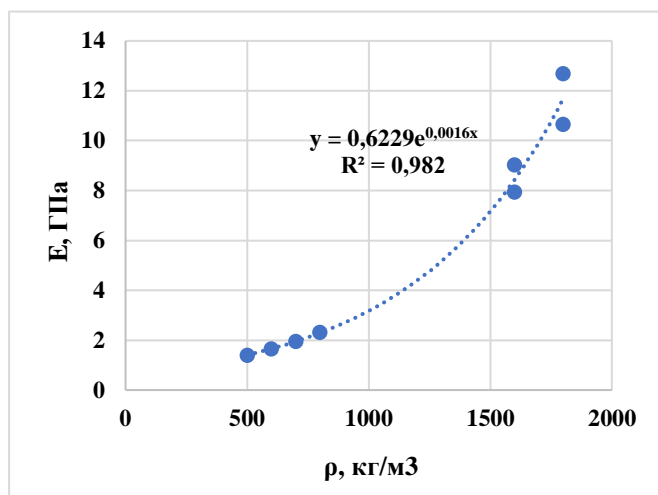


Рисунок 14 – Зависимость значения модуля упругости от плотности материала

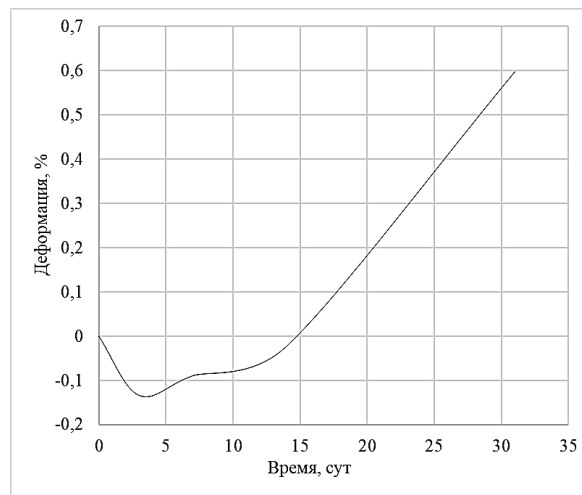


Рисунок 15 – Деформации усадки и расширения композита

Влияние режимов ТВО на физико-механические характеристики поризованного композиционного арболитового материала. Проведенными исследованиями установлено, что положительное влияние ТВО на прочность композита достигаются при температурах 80°C и 90°C с длительностью изотермической выдержки от 6 до 12 часов. График зависимости прочности бетона от режима ТВО представлен на рис. 16.

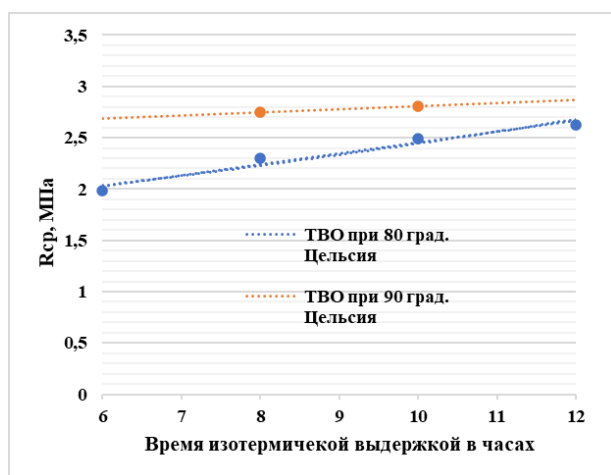


Рисунок 14 – Зависимость прочности бетона от режима ТВО

В результате проведенного анализа, было установлено, что в условиях ТВО оптимальные физико-механические характеристики достигаются при температуре 80°C и времени изотермической выдержки 10 часов. При этом повышение температуры изотермической выдержки до 90°C ведет к сокращению времени изотермической выдержки с 10 до 8 часов, при повышении показателей прочности.

Опытно-промышленные испытания полученных поризованных композиционных арболитовых материалов на основе шлакосиликатных вяжущих проводились на базе департамента технического развития исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы». Основные характеристики полученного материала представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Техническая характеристика арболита на основе шлакосиликатной поризованной смеси для ограждающих конструкций

№ пп	Наименование показателя		Единицы измерения	Значение показателя	
				Фактическое	Требование стандартов
1	Прочность при сжатии, в возрасте	1 сут.	МПа	0,75	-
		28 сут.		1,9	1,56-1,95
2	Прочность при изгибе		МПа	1,58	не менее 0,35
3	Средняя плотность		кг/м ³	600	600-700
4	Коэффициент теплопроводности		Вт/(м°С)	0,081	0,120

Разработанный арболит на основе шлакосиликатной поризованной смеси по своим строительно-техническим характеристикам соответствуют требованиям, предъявляемым к этим видам строительных материалов для ограждающих конструкций, а по некоторым показателям значительно их превышают. Так коэффициент теплопроводности у разработанного состава на 32,5% ниже, чем требуется ГОСТом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан конструкционно-теплоизоляционный поризованный арболит высокого качества на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака, жидкого стекла, щепы хвойных пород древесины и технической пены с оптимальными параметрами качества. Показано, что доменный гранулированный шлак, содержащий 85% и более аморфной фазы с дисперсностью не менее 500 м²/кг, а также натриевое жидкое стекло плотностью не менее 1310 кг/м³, щепы хвойных пород древесины, и техническая пена с оптимальными параметрами качества являются эффективными компонентами для производства поризованного арболита с маркой по плотности D600 - D700.

Установлено, что высокое качество арболита достигается поризацией шлакосиликатной арболитовой смеси синтетическими пенообразующими добавками, стабилизированными тонкомолотой бентонитовой глиной, которая позволяет получать пену с низким водоотделением (28,2%) и высокой кратностью (12,4), а также проникновением в структуру заполнителя шлакощелочного связующего с последующей его кристаллизацией в порах заполнителя, что обуславливает получение водостойкого композита.

Разработаны рецептуры композиционных поризованных арболитовых материалов и получены их физико-механические и технические характеристики позволяющие повысить эффективность арболитов для конструкционно-теплоизоляционных материалов. Проведены опытно-промышленные испытания предложенных составов арболитов.

Основные выводы:

1. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность использования тонкомолотого доменного гранулированного шлака, а также жидкого стекла, щепы хвойных пород древесины и технической пены с оптимальными параметрами в качестве эффективных компонентов для производства конструкционно-теплоизоляционного поризованного арболита высокого качества.

2. Установлено, что синтетический пенообразователь с концентрацией раствора 3,3% может эффективно применяться вкуче с добавкой стабилизатором в виде тонкодисперсного порошка бентонитовой глины в количестве равном 4% от массы раствора для производства технической пены с низким показателем водоотделения (28, 2%) и высокой кратностью 12,4.

3. Произведен подбор состава арболита плотностью 600 кг/м³ с оптимальными значениями соотношения затворитель/шлак, позволяющей получать композит с высокими строительно-техническими свойствами. Расчётно-экспериментальным путем произведен подбор оптимального состава поризованного шлакосиликатного арболита с маркой по плотности D600. С помощью математического метода двухфакторного композиционного эксперимента, было установлено влияние рецептурных факторов на физико-механические характеристики композита из шлакощелочного вяжущего на основе доменного гранулированного шлака, жидкого стекла и древесной щепы хвойных пород. На основании полученных зависимостей, были построены модели, рационально описывающие исследуемую систему, в рамках выбранного факторного пространства.

4. Физико-химическими методами анализа изучена структура полученного поризованного арболитового материала. Установлено, что полученный композиционный материал состоит из аморфной и кристаллической фаз. При этом содержание аморфной фазы в материале, независимо от условий твердения находится в пределах 90-92%. Установлено, что основными новообразованиями присутствующими в образцах являются низкоосновные гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция и натрия, а также тоберморит, гиролит и акерманит. При этом самое высокое их содержание наблюдается в образце, твердевшем в условиях ТВО при 90°C в течение 10 часов. Изучена зона контакта заполнитель-вяжущее, установлено, что на поверхности древесины образуются новообразования схожей природы, что и в самом шлакосиликатном камне, что повышает её водостойкость.

5. Изучена поровая структура поризованного шлакосиликатного арболита, установлено, что полученная пористая структура, отличается равномерно распределенными порами с

размерами в основном, ≥ 1 мм. Показано, что данная структура имеет замкнутую пористость со сплошными и ровными межпоровыми перегородками. Проведенными испытаниями водопоглощения не обработанной древесной щепы и щепы извлеченной из поризованного шлакосиликатного композита, показано, что водопоглощение такой щепы снижается вплоть до 68% по сравнению с необработанной древесной щепой.

6. Установлено, что доменный гранулированный шлак полусухого способа грануляции, содержащий 85% и более аморфной фазы с дисперсностью 450 – 500 м²/кг, а также жидкое стекло плотностью – 1310 кг/м³ и щепы хвойных пород древесины являются эффективными компонентами для производства арболита высокого качества. Определены основные физико-механические показатели полученного композита. Плотность полученного композита в естественном состоянии находилась на уровне – 730 кг/м³, прочность на изгиб – 1,92 МПа. Установлено, что механическая прочность полученного композиционного арболита увеличивается (на 0,26 МПа) с уменьшением его плотности и содержания раствора жидкого стекла, а оптимальные физико-механические показатели шлакосиликатного арболита достигаются при соотношении затворитель/вяжущее равном 0,52.

7. Определены рецептурные составы поризованного шлакосиликатного композиционного арболита. Получен композит с маркой по плотности D 600 и прочностью 1,50 МПа. Полученный композит имел водопоглощение по массе (W_m) 74,25% и объёму (W_o) 51,38% соответственно. Установлен объём открытых капиллярных пор шлакосиликатного арболита равный водопоглощению по объёму образца (51,38%). Определен коэффициент размягчения полученного композита (K_p), который равен 0,63, при этом коэффициент теплопроводности для образца со средней плотностью 600 кг/м³ составил 0,081 Вт/(м·°С), а модуль упругости находился на уровне 1,69 ГПа.

8. Установлено положительное влияние ТВО при температурах 80°С и 90°С и длительностью изотермической выдержки от 6 до 12 часов на структуру и свойства шлакосиликатного поризованного арболита. Оптимальные физико-механические характеристики достигаются при температуре 80°С и времени изотермической выдержки 10 часов. При этом повышение температуры изотермической выдержки на 10°С (до 90°С) ведет к сокращению времени изотермической выдержки с 10 до 8 часов, при повышении показателей прочности.

9. Апробирование полученных в результате работы составов шлакосиликатного поризованного арболита полученного с использованием отходов промышленных предприятий, проводились на базе департамента технического развития исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы». Было подтверждено, что разработанный композиционный материал может применяться в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений индивидуального жилищного строительства, а также в качестве самонесущих стен и перегородок. Кроме

высоких физико-механических показателей шлакосиликатный поризованный арболит обладает низкой теплопроводностью, что в свою очередь позволяет снизить себестоимость строительства, за счет исключения необходимости дополнительного утепления.

Рекомендации.

Разработанный композиционный поризованный арболитовый материал может применяться в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений индивидуального жилищного строительства, а также в качестве самонесущих стен и перегородок.

Разработанный строительный материал кроме высоких физико-механических показателей обладает низкой теплопроводностью, что в свою очередь позволяет снизить себестоимость строительства, за счет исключения необходимости дополнительного утепления.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Технология производства поризованного арболита с использованием вяжущего на основе портландцемента уже находит свое применение в строительной отрасли, поэтому дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на изучение влияния новых видов связующих, в том числе с использованием различных отходов промышленности, а также эффективных пенообразователей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации

1. Величко Е.Г., Дворников Р.М. Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлакосиликатных вяжущих веществ // Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. № 4. С. 179-189.
2. Дворников Р. М., Самченко С. В. Формирование ячеистой структуры поризованного арболита // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 1. С. 82-91.
3. Дворников Р.М., Самченко С.В. Изучение зоны контакта шлакосиликатного поризованного композита с древесной щепой в арболитовых материалах // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. №2. С. 157 – 167.

4. Хеирбеков Р.А., Самченко С.В. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. №4. С 379-390.

Публикации, индексируемые международных реферативных базах SCOPUS

5. Dvornikov R.M., Velichko E.G. Wood concrete modified with ground granulated blast furnace slag // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. № 6 (91). С. 9107.

Публикации в других научных журналах и изданиях

6. Дворников Р.М. Применение шлакосиликатных вяжущих для производства высокоэффективных строительных материалов на основе отходов деревообрабатывающей промышленности // Наука и современное общество: взаимодействие и развитие. 2019. № 1 (6). С. 101-104.

7. Alobaidi D.A.K., Дворников Р.М., Величко Е.Г. Модифицированный пенобетон с оптимизированным дисперсно-гранулометрическим составом // В сборнике: Актуальные вопросы строительного материаловедения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Улан-Удэ, 2021. С. 76-80. DOI: 10.18101/978-5-9793-1632-1-76-80

8. Дворников Р.М., Alobaidi D.A.K., Величко Е.Г. Шлакосиликатный полистиролбетон с модифицированным дисперсным составом // В сборнике: Актуальные вопросы строительного материаловедения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Улан-Удэ, 2021. С. 81-87.

9. Дворников Р.М., Величко Е.Г. Пути повышения качества высокоэффективного арболитобетона на основе отходов промышленности // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021. Сборник докладов Второй Национальной научной конференции. Москва, 2022. С. 309-312.

Автор выражает благодарность первому научному руководителю

доктору технических наук, профессору

Величко Евгению Георгиевичу