

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Хеирбеков Руслан Азерович

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

2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Самченко Светлана Васильевна

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ	14
1.1. Особенности получения и применения высокоэффективных композиционных арболитовых материалов на основе промышленных отходов	14
1.2. Общие сведения о шлакосиликатных вяжущих веществах	23
1.3. Некоторые аспекты формирования ячеистой структуры поризованных композиционных шлакосиликатных арболитов.....	36
Выводы по Главе 1	43
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	46
2.1. Материалы	46
2.2. Методы.....	51
2.2.1. Физико-химические методы исследования материалов	51
2.2.2. Подбор состава композиционного арболитового материала	54
2.2.3. Механические методы испытания композиционного материала	55
Выводы по Главе 2	56
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПОРИЗОВАННЫХ ШЛАКОСИЛИКАТНЫХ АРБОЛИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	57
3.1. Получение технической пены с оптимальными параметрами качества, а также оптимизация её состава	57
3.2. Кинетика процессов формирования структуры композиционного поризованного арболита.....	64
3.3. Влияние компонентов арболитовых композиционных материалов на плотность изделий.....	70
3.3.1. Разработка и оптимизация состава поризованного арболитового материала математическим методом двухфакторного композиционного эксперимента	72
3.4. Изучение структуры арболитовых материалов	77
ГЛАВА 4. СВОЙСТВА ПОРИЗОВАННОГО АРБОЛИТОВОГО КОМПОЗИТА.....	92
4.1. Физико-механические свойства арболитового материала	92
4.2. Водопоглощение композиционного арболитового материала	96

4.3. Теплопроводность шлакосиликатного поризованного арболитового материала	98
4.4. Модуль упругости и усадка поризованного арболитового композиционного материала.....	99
4.5. Влияние режимов ТВО на физико-механические характеристики поризованного композиционного арболитового материала.....	102
Выводы по Главе 4	104
ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ПОРИЗОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ АРБОЛИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ШЛАКОСИЛИКАТНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ.....	106
5.1. Выпуск опытно промышленной партии.....	106
5.2. Экологическая и экономическая эффективность полученного шлакосиликатного поризованного арболитового материала	108
Выводы по Главе 5	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт опытно-промышленного опробования результатов диссертационной работы.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Рекомендации по изготовлению поризованного арболитового материала и применению его в строительстве	131

ВВЕДЕНИЕ

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 D600-D700. 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:

1. Обосновать выбор компонентов доменного гранулированного шлака, древесной щепы и бентонитовой глины, обеспечивающих максимальные показатели эксплуатационных свойств арболитового композита;
2. 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;

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

4. Изучить физико-механических характеристик поризованного шлакосиликатного арболитового композита и установить зависимости, описывающие основные параметры его качества;

5. Изучить закономерности формирования структуры шлакосиликатного поризованного арболита современными методами анализа;

6. 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 $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, а также модифицированное жидкое стекло плотностью не менее 1310 кг/м^3 , 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 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.

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:

1. 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.

2. 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%.

3. Получен арболитовый композиционный материал с маркой по плотности D600 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 GPa.

4. 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 10оС (до 90°С) ведет к сокращению времени изотермической выдержки с 10 до 8 часов, при повышении показателей прочности.

5. 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».

6. 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:

1. Обоснованный выбор компонентов, обеспечивающих максимальные показатели эксплуатационных свойств арболитового

композита на основе доменного гранулированного шлака, древесной щепы и бентонитовой глины;

2. 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;

3. Оптимальный состав поризованного шлакосилакатного арболита и математические модели зависимости физико-механических характеристик смесей от их состава;

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

5. Результаты исследований структурообразования и свойств полученных шлакосиликатных поризованных композиционных арболитовых материалов;

6. 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, участия в конференциях и подготовке статей для публикации.

Апробация результатов 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 опубликовано 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Особенности получения и применения высокоэффективных композиционных арболитовых материалов на основе промышленных отходов

С начала 21-го столетия растущий объем строительства по всему миру predetermined высокий спрос на основные конструкционные, строительные материалы к которым относится, в частности, продукция металлургических предприятий, заводов по производству вяжущих веществ, а также изделия заводов деревообрабатывающей промышленности.

Высокие объемы производства строительной продукции, спровоцировали рост количества промышленных отходов в районе действия предприятий. Кроме того, в процессе производства портландцемента, образуется большое количество вредного газа CO_2 . Ежегодные выбросы углекислого газа в атмосферу предприятиями цементной промышленности составляют более 7% от общемировых показателей [1–4]. Вдобавок ко всему, добыча полезных ископаемых, в том числе для строительной отрасли, ведёт к истощению природных ресурсов и в будущем может стать причиной экологического кризиса на планете [5].

На фоне глобальных природных изменений техногенного характера всё более остро обсуждается вопрос экологической безопасности и охраны окружающей среды. В этой связи, на первый план выходят задачи по пересмотру технологий производства и потребления строительной продукции.

Одним из наиболее эффективных вариантов решения поставленных задач, является использование крупнотоннажных отходов промышленности для производства строительных материалов. Данная мера позволит найти альтернативу широко распространённым материалам таким, например, как портландцемент, а также найти применение отходам промышленности, что в

свою очередь поспособствует улучшению экологической обстановки в районе действия предприятий.

В то же время, рост интереса к разработке строительных материалов на основе отходов промышленных предприятий обусловлен возрастающими требованиями к физико-механическим и теплотехническим свойствам строительных конструкций. Вдобавок ко всему, в процессе возведения многих сооружений и зданий возникает необходимость применения недорогих и качественных строительных материалов.

С начала XXI века наблюдается рост спроса на строительные материалы, которые были изготовлены на базе отходов промышленного производства, в частности из доменных гранулированных шлаков и отходов деревообрабатывающей промышленности (дроблёнка, опилки, щепа и т.п.) [6–9]. Также в последнее время при возведении самонесущих ограждающих конструкций большую популярность получили стеновые блоки из негорючего и экологически чистого арболита неавтоклавного твердения марок средней плотностью от D600 до D700.

В нашей стране вопросы применения древесных отходов в строительной индустрии начали исследовать в 30-е годы XX века. В период выполнения первых пятилетних планов развития народного хозяйства потребность в строительных материалах стимулировала исследования в данной сфере. В 1926 году в строительстве начали использовать опилкобетон (легкий бетон на основе песка, опилок и портландцемента). Из данного материала возведены и успешно эксплуатируются здания различного назначения [10–14].

В 1927 году было предложено использовать древесные опилки с целью производства ксилолита. В данном материале в качестве вяжущего компонента использовались композиции на основе активного оксида магния. С 1929 года в СССР запущен в производство цементный фибролит. Он используется в строительстве в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала для устройства различных частей зданий.

В 1959 г. по распоряжению П. Н. Ершова, Ф.Д. Вараксина и Е. Ю. Кобцева в СССР начали изготавливать арболит. На сегодняшний день множество проектных, научных и учебных организаций проводят исследования в области данного материала.

Научные институты Советского Союза и зарубежных стран трудились над активным продвижением арболита (деревобетона).

В работах Г. А. Бужевича, П.А. Рибиндера, И.Х. Нанизашвилли, и др. выявлено следующее свойство: органоминеральные композиции на основе цемента и отходов деревообработки обладают огнестойкостью, высокой прочностью, низкой теплопроводностью, а также низкой себестоимостью за счет использования в их составе промышленных отходов.

Помимо этого в работах [15–18] подтверждается, что отходы деревообработки (опилки, дробленка и щепа) могут являться основой для производства легких композиционных арболитовых материалов.

За рубежом арболит используется достаточно давно. Данный материал применяют для возведения малоэтажных зданий и в монолитном строительстве при постройке высотных зданий каркасного типа. В США и Канаде аналог арболита имеет название «Вудстоун»; Австрии - «Велокс»; Германии - «Дюрипанель», Швейцарии - «Дюризол»; Чехии - «Пилинобетон». В азиатских странах (в частности, в Японии) аналог арболита называется «чентери - боард» [19–22].

Давно известно, что большую часть тепловой энергии, которая идет на обогрев помещений, теряется через конструкции стен. Показатель потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции стен находится в пределах 15–20% [23,24]

Одним из основных факторов, которые влияют на теплопроводящую способность ограждающих конструкции, является показатель теплопроводности материала, из которого они изготовлены.

Значимым показателем для конструкционно-теплоизоляционных материалов, влияющим на их основные физико-механические свойства, является средняя плотность.

Снижение средней плотности и улучшение физико-механических характеристик являются одной из главных задач в технологии легких бетонов. Вместе с уменьшением плотности снижается и показатель теплопроводности. Помимо этого, значительно улучшаются строительные-технические свойства бетона.

В работе [25] по исследованию механических свойств и микроструктуры композиционного материала на основе цемента и древесного заполнителя, отмечаются высокие теплотехнические свойства получаемого материала, близкую к таким материалам как пенополистирол и стекловату. Кроме того, отмечается высокая экономическая эффективность производства таких композитов.

В работах [26–28] отмечается высокие звукопоглощающие свойства и в связи с этим высокую звукоизоляционную способность данного материала.

Интерес к использованию композитных материалов на основе древесины, растёт, в частности, из-за их способности регулировать микроклимат в помещении. Многочисленные исследования [29–31] показали, что гигроскопичность материалов на с использованием компонентов растительного происхождения позволяет регулировать влажность окружающей среды. Также одним из перспективных направлений в технологии высокоэффективных арболитовых материалов является технология получения поризованного арболита. Наряду с высокими физико-механическими свойствами, данный материал имеет теплопроводность в несколько раз ниже, чем у известных аналогов: пенобетона, газобетона и пр. Производство и применение поризованного арболита является перспективным направлением в производстве арболитовых материалов [32].

Получаемая в результате поризации с помощью порообразующих добавок (пенообразователей, газообразователей и пр.) структура, обеспечивает

высокую трещиностойкость, морозостойкость и водостойкость. Кроме того, улучшенные поверхности граней изделий из такого бетона исключает необходимость дополнительной обработки или нанесения выравнивающих и декоративных составов. Помимо этого, композиты с высокой, равномерной пористостью исключают возможность промокания стеновых конструкций во время косых дождей [33,34].

В работе [35] показана возможность получения прочных поризованных арболитовых изделий с прочностью до 15% выше, чем у обычного арболита при одинаковых значениях плотности. При этом в работе указывается, что показатели плотности таких композитов могут быть снижены на значения до 100кг/м^3 по сравнению с обычным арболитом, при использовании одного и того же заполнителя.

Поризация арболитовой смеси ведет к улучшению её реологических свойств, это ведет к уменьшению цикла формирования изделий, в частности ведет к уменьшению расслоения смеси при транспортировке, а также даёт возможность избавиться от операции прессования изделий. К примеру, при изготовлении поризованной арболитовой смеси с осадкой конуса 1–3 см может быть использовано стандартное оборудование заводов железобетона, без изменения основного цикла производства, что ведет к уменьшению затрат на изготовление композита [36,37].

Несмотря на все очевидные преимущества использования арболитовых материалов для строительства зданий и сооружений, у данного материала есть ряд недостатков, которые ограничивают его широкое применение.

Органический заполнитель является одним из основных компонентов арболита. Поэтому вид заполнителя и его свойства в значительной степени влияют на его конечные свойства.

Исследователи в работах [38,39] отмечают, что прочностные свойства композита сильно зависят от вида и формы применяемого органического заполнителя. Кроме того, большая адсорбирующая способность заполнителя ведёт к ухудшению морозостойкости материала.

Для производства арболита используют в основном древесную щепу хвойных пород: ель, сосна, кедр, пихта. Кроме того, в настоящее время широкое распространение получили органические заполнители на основе местного сырья, в том числе агрокультур: рисовая лузга, сечка камыша, костра конопли и пр [6][40].

Одним из базовых компонентов арболита является древесная щепа. Данный продукт применяется в качестве наполнителя и заполняет до 90% объема всего композита. Однако вещества, которые соежжатся в древесине (сахароза, глюкоза, фруктоза, гемицеллюлоза и пр.), в процессе взаимодействия с щелочной средой твердеющего цементного теста выделяют «цементные яды», которые затрудняют процессы структурообразования в композите [41,42].

По данным ученого И. Х. Наназашвили воздействие «Цементных ядов» на процессы структурного образования в цементном композите в процессе твердения проявляется аналогично действию поверхностно активных веществ. Водорастворимые вещества древесины содержат в основном углеводные группы НОСН и способны, осаждаясь на поверхности частиц минералов цемента ($3\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ и $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$), формировать тончайшие оболочки, изолирующие тонкодисперсные частицы вяжущего и замедляющие процессы гидратации и гидролиза цемента [21,22,37].

Для уменьшения вреда «цементных ядов» процессам гидратации портландцемента были изобретены различные методы ускорения процессов твердения и нейтрализации вредных веществ. В частности, известны способы нейтрализации водорастворимых веществ древесины путем длительного выдерживания сырья (от 3-х месяцев) и высушивания, а также пропитке растворами солей или минерализации. Кроме минерализации сырья рекомендуется также использовать древесину только хвойных пород, в то же время наличие примеси коры должно быть сведено к минимуму. Применение данных методов требует дополнительного оборудования и рабочих

площадей, что в значительной степени усложняет процесс производства и влияет на увеличение конечной цены продукта [8,10,43]

В этой связи, производство эффективного по теплофизическим, технологическим и экономическим параметрам арболита является проблемным благодаря затратной и сложной технологии изготовления данного материала.

Широкие перспективы применения древесины для производства легких бетонов открыли бесцементные вяжущие вещества, например, шлакосиликатные вяжущие.

Исследования ученых А.О. Пурдона, В.Д. Глуховского, В. И. Калашникова, Д. Давидовича и др. определяют вопрос производства шлакосиликатных вяжущих веществ на основе алюмосиликатного сырья и щелочных активизаторов твердения, в том числе показывают перспективу использования доменного гранулированного шлака различного генезиса в качестве сырья для изготовления бетонов и шлакосиликатных вяжущих.

В 1967 году ученые О. Н. Сикорский и Г. В. Румына получили шлакощелочной бетон на основе органических заполнителей. Данный бетон имел прочность при сжатии 8МПа и плотность на уровне 1300 кг/м³.

В 1970 году на основании исследований В. Д. Глуховского и Ж. В. Скурчинской были получены прессованные материалы на базе древесных опилок и шлакосиликатного вяжущего.

В результате воздействия щелочи на древесный заполнитель, резко меняется молекулярная природа поверхности последнего.

В работах [41,44,45] указано, что экстрактивные вещества древесины принимают активное участие в создании поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые представляют из себя продукт взаимодействия компонентов шлако-силикатных вяжущих с элементами органического заполнителя. Опыты выявили, что во время структурообразования шлакощелочных композиций на основе древесного заполнителя, появляются поверхностно-активные вещества, которые содержат ион щелочных металлов.

Возникающие при гидратации шлакосиликатных вяжущих новообразования нейтрализуют вредное влияние «древесных ядов», при этом возникающие щелочные растворимые мыла являются источником новообразований в процессе взаимодействия со шлаком минералов цеолитового состава и низкоосновных гидросиликатов кальция. Присутствующие в системе ПАВ регулируют сроки схватывания смеси, а также оказывают положительное влияние на удобоукладываемость и повышают жизнеспособность смеси [46][47].

Положительное влияние модификации поверхности органического заполнителя под воздействием компонентов шлакосиликатных вяжущих отмечают и зарубежные исследователи.

В исследовании [48] изучалось влияние предварительной обработки 2М раствором NaOH заполнителя на основе стеблей сарго на свойства композита на основе золошлакового вяжущего. Было установлено, что предварительная обработка заполнителя помогает получить композит с высокими физико-механическими характеристиками: прочностью на сжатие, изгиб и т. п.

Исследователями в работе [49] были проведены исследования по влиянию обработки органического заполнителя на основе стеблей абаки растворами NaOH в течение 48 и $Al_2(SO_4)_3$ (РН-6) в течение 12 часов. В результате было установлено, что наибольшие показатели прочности достигаются после замачивания заполнителя в последнем растворе. Улучшение прочности частично объясняется удалением лигнина, пектина и гемицеллюлозы и, частично, шероховатостью поверхности волокна из-за осаждения гидроксида алюминия.

Таким образом, улучшается связь между геополимерной матрицей и органическим заполнителем из стеблей абака, в то время как осаждение нерастворимого гидроксида алюминия защищает волокна от разрушения щелочной геополимерной матрицей [49].

Бесцементные, шлакосиликатные вяжущие вещества благодаря своим свойствам создают предпосылки для создания высокоэффективных

композитов на основе различных органических заполнителей: древесных опилок, дробленки, стружки, щепы и т. п. Кроме того, в качестве эффективных заполнителей могут служить отходы сельскохозяйственных культур.

Композиционные материалы на основе шлакосиликатных вяжущих и органического заполнителя обладают и высокой прочностью. К примеру, в Киевском инженерно-строительном институте [44] были созданы шлакосиликатные композиции с использованием древесных опилок, стружки, дробленки в качестве заполнителя. Показатели прочности, при той же плотности, для полученного композита оказались в среднем в 1,5–2 раз выше значений указанных в ГОСТ 19222–2019 (Арболит и изделия из него. Общие технические условия).

Исследованиями арболитовых материалов на основе отходов местного сырья занимались в Ташкентском политехническом институте [50].

Также и в Новосибирском инженерно-строительном институте был разработан композит на основе шлакосиликатных вяжущих в состав которого входил гидролизный лигнин. Из достоинств данного материала можно отметить высокую прочность при сжатии (до 5МПа) [46,51,52].

В случае использования бесцементных, шлакосиликатных вяжущих для производства арболитовых материалов, можно применять не только заполнитель из отходов хвойных пород древесины, но и лиственных. Кроме того, в сырье могут присутствовать пороки древесины, в том числе кора.

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что на основе шлакосиликатных вяжущих веществ можно получать высокоэффективные бетоны с использованием органического заполнителя практически любого типа. Кроме того, характерные для данного типа вяжущих новообразования возникающие при твердении, дают повод полагать, что вредные, экстрактивные вещества, выделяемые заполнителем, в определённой степени нейтрализуются, что даёт возможность получать композиты с высокими физико-механическими и строительно-техническими свойствами.

1.2. Общие сведения о шлакосиликатных вяжущих веществах

Доменные шлаки различного генезиса нашли свое применение в различных областях строительства ещё с конца 19-го века.

Известно, что в 1892 году в Германии стал выпускаться шлакопортландцемент. В тот же период в России, в городах Днепропетровск и Кривой Рог, были построены шлакобетонные здания.

В 1908 году в городе Днепропетровск был построен завод шлакового кирпича. В 1913–1914 годах там же был построен завод по производству шлакопортландцемента.

С течением времени области применения доменного шлака расширялись 30-м годам прошлого столетия данный материал уже применяли при производстве кирпича, цемента, растворов и бетонов, дорожном строительстве.

Отдельным направлением развития применения доменных шлаков в строительстве считается производство бесклинкерных, шлакосиликатных вяжущих веществ.

Шлакосиликатные вяжущие вещества — это гидравлические вяжущие вещества, полученные на основе гранулированных шлаков совместно со щелочными добавками, а также затворённые растворами специальных активизаторов твердения. Эффективными щелочными активизаторами являются растворы: соды кальцинированной, метасиликата натрия, содощелочного плава, едкого натра и пр. [53,54].

Предпосылкой возникновения новых бесклинкерных вяжущих щелочной активации послужила широкая распространенность щелочных и щелочноземельных металлов, а также смешанных гидроалюмосиликатных новообразований высокой прочности в земной коре. Кроме того, множество исследований в области минералогии, а также изучение процессов структурообразования вяжущих веществ также послужили толчком к разработке новых материалов в этой области [55,56]

Основным сырьём для производства шлакосиликатных вяжущих являются гранулированные доменные, электротермофосфорные шлаки, а также шлаки цветной металлургии. Наиболее широко при производстве строительных материалов применяются доменные шлаки. Их популярность в строительной отрасли обусловлена, в частности, близостью их химического состава к составу цемента, а также их способностью шлаков быстрого охлаждения проявлять гидравлические свойства при взаимодействии с активизаторами и пр. [53,57,58].

Доменный шлак получают благодаря обжигу железной руды в восстановительной среде совместно с флюсами в процессе применения кокса в роли топлива. Флюсами являются карбонатные породы, состоящие из доломитезированных известняков. В результате протекающих в восстановительной среде химических реакций при плавлении руды между компонентами флюсов, содержащимися в руде в качестве примесей оксидами кремния и алюминия и пр., а также минеральными остатками от сгорания кокса образуются новые химические соединения силикатов и алюминатов кальция и магния [59].

На гидравлические свойства шлака в первую очередь оказывают влияние процессы, происходящие его производстве, в частности, большую роль играет скорость охлаждения расплава, а также способ грануляции.

Для производства шлакосиликатных вяжущих используются в основном шлаки, которые при изготовлении подверглись быстрому охлаждению. Так называемые шлаки быстрого охлаждения в процессе грануляции приобретают стекловидную метастабильную (неустойчивую) структуру [59].

Грануляция шлаков – наиболее простой и распространённый способ обработки шлаков. Гранулированные шлаки получают путем резкого охлаждения расплавов водой, паром или воздухом. Получаемые в результате этого зерна размером до 10 мм могут подвергаться дальнейшей обработке, в частности помолу до нужной удельной поверхности ($150 \dots 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ и более) [60,61]

В общем случае доменный шлак с более высокой тонкостью помола означает большую реакционную способность, но в то же время требует больше воды для гидратации, что приводит к более высокой пористости конечного композита и более низкой прочности [61,62]

К примеру, в работе [63] обнаружили, что механическая прочность образцов шлакосиликатного композита, возрастает в узких пределах, при росте тонкость помола доменного шлака с 5300 до 6700 см²/г (по Блейну).

Ученые Таллинг и Брандстер [64] получили высокопрочные композиты с тонкостью помола шлака равной 4000 см²/г. Согласно работе Ванга и др. [65] оптимальная тонкость по Блейну зависит от типа шлака и колеблется от 4000 до 5500 см²/г.

Авторы в работе [66] изучавшие шлаковые вяжущее активированные щелочью, получали более низкую механическую прочность при увеличении тонкости помола с 4500 до 9000 см²/г. (по Блейну). Они также пришли к выводу, что среди параметров, влияющих на прочность композита тонкость помола была наименее значимой.

Авторы Броу и Аткинсон [67] изучали доменные шлаки, активированные щелочью, и сообщили, что увеличение тонкости помола по Блейну с 3320 до 5500 см²/г приводит к увеличению механической прочности с 65 до 100 МПа.

Быстро охлажденные доменные шлаки содержат в своем составе стекловидную фазу, в которой преобладает С₂S в β-форме, которая обладает высокой гидравлической активностью [21,68]

Напротив же шлаки с высоким содержанием СаО (45–46%) при медленном охлаждении могут рассыпаться в тонкий порошок. Причиной данному явлению служит полиморфный переход С₂S при температуре 675°С из β в γ- форму. При этом происходит увеличение объёма минерала и как следствие образование высокого напряжения в системе, что является причиной растрескивания шлака и его разрушения. Данный феномен носит название силикатный распад шлака [59,60].

Также может возникать известковый распад, который происходит при гашении свободной извести, находящейся в шлаке в повышенном содержании в виде отдельной фазы. Кроме того, в может возникать железистый распад, который происходит в результате взаимодействия FeS (сульфида железа) с атмосферной влагой. Такой же принцип прослеживается и при марганцевом распаде шлака [53,60]

Шлаки медленного охлаждения мало пригодны для изготовления вяжущих веществ из-за образования в большом количестве кристаллической фазы, которая не обладает гидравлической активностью [69].

Гидравлические свойства доменных гранулированных шлаков объясняются наличием в их составе (90% и более) оксидов: SiO_2 ; Al_2O_3 ; CaO ; MgO , а также оксидов: TiO_2 MnO FeO и сульфидов: CaS ; MnS ; FeS . Высокая гидравлическая активность шлаков зависит от содержания оксида алюминия и кальция, в то время как оксид кремния снижает её. Кроме того, гидравлическая активность оксида магния равна активности CaO . MgO в доменном гранулированном шлаке не вызывает изменения объёма, так как не кристаллизуется в виде отдельной фазы и находятся в химически связанном состоянии [70,71].

В общем случае шлаки делятся на основные ($M_o > 1$) и кислые ($M_o < 1$). Считается, что основные шлаки более химически активны, чем кислые, и имеют более высокий темп набора прочности. Объяснением этому служит наличие в составе таких шлаков более основных кристаллических новообразований состоящих преимущественно из ортосиликатов и мелилитов, которые при гидратации служат центрами кристаллизации [72].

Показатель гидравлической активности шлаков носит название коэффициент качества (К). Данный показатель определяется в соответствии с ГОСТ 3476–74 («Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов»), в зависимости от содержания в составе шлака оксида магния.

Высокое значение при изготовлении композиционных материалов с высокими физико-механическими свойствами, на основе шлакосиликатных вяжущих имеет щелочной активизатор. К примеру, ученые Фернандес-Хименес и др. [73], отмечают, что наиболее важными параметрами, влияющими на механическую прочность композитов на основе активированных щелочью доменных шлаков, являются: природа щелочного активатора, концентрация активатора, температура термической обработки и тонкость помола. Исследователи в работе [74] изучавший активированные щелочью шлаки, также сообщает о значимости использования правильно подобранного активизатора. Кроме того, автор отмечает, что при увеличении концентрации щелочного активатора увеличивается и механическая прочность конечного композита.

Наиболее часто используемые щелочные активаторы представляют собой смесь гидроксида натрия или калия (NaOH , KOH) с натриевым жидким стеклом ($n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$) или калиевым жидким стеклом ($n\text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$) [56,62,63,75–78].

Наилучшими активизаторами твердения доменных шлаков, для которых $M_0 > 1$, считаются щелочные компоненты любой группы. Кислые шлаки рекомендуется затворять едкими щелочами и щелочными силикатами со значением $M_0 = 0.5\text{--}2$. В то же время для составов подвергающихся тепловлажностной обработке могут применяться не силикатные соли слабых кислот и их смеси [68,79–81].

В работах [65,82–85] высказывается мнение, что наиболее эффективным активизатором алюмосиликатного сырья, при котором достигаются наилучшие физико-механические характеристики, является жидкое стекло. Использование затворителя в виде жидкого стекла способствует формированию более плотного и прочного искусственного композита и, кроме того, в процессе твердения формируются более низкоосновные гидраты, чем в присутствии щелочных активизаторов, не содержащих силикаты.

Это утверждение также разделяют ученые Криадо и др. [86], согласно которым жидкое стекло благоприятствует процессу полимеризации что приводит к получению гидратов с большим содержанием кремния и большей механической прочностью.

Также ученые Фернандес-Хименес и Паломо [84,87] сообщили об увеличении механической прочности с 40 до 90 МПа при использовании в качестве активизатора NaOH и жидкого стекла, вместо NaOH.

Силикатный модуль является основной характеристикой жидкого стекла, определяя содержание основных оксидов Na_2O и SiO_2 . Использование в качестве активизаторов жидких стекол с низким силикатным (1–1,5) модулем M_c ведет к получению высокопрочных шлакосиликатных композитов [88,89].

Ванг и др. [65] утверждают, что при использовании щелочного активатора с силикатным модулем равным 1–1,5 ведет к получению композита повышенной прочности. Другие авторы [90–92] также утверждают, что активация доменного шлака активатором на основе жидкого стекла ($M_c = 1,25$) приводит к получению композита с высокими физико-механическими характеристиками.

Ученые Кризан и Живанович [93] изучали щелочную активацию доменного шлака жидким стеклом, отметив, что наибольшая прочность была получена для образцов, затворенных жидким стеклом с модулем основности равным 1,2–1,5.

Можно сделать вывод, что вяжущие щелочной активации затворенные активизатором на основе жидкого стекла обладают высокой конечной прочностью и особенно, характеризуются быстрым набором прочности в начальные сроки твердения. Данные характеристики объясняются протеканием интенсивных катионообменных процессов, в связи с наличием в системе коллоидного SiO_2 .

В Советском Союзе ещё в 30-х годах двадцатого столетия множество научных групп разрабатывали вяжущие вещества на основе шлаков.

В 1930 годах двадцатого века, в своих опытах по производству бесклинкерных шлако-цементов ученые П.П. Будников и В.М. Лежоев сделали вывод, что из гранулированных полусухим способом доменных шлаков можно изготовить бесклинкерный шлакоцемент. Кроме того, была показана возможность затворения шлака щелочными активизирующими компонентами, в том числе растворимым стеклом [54].

В то же время, в Украинском институте силикатов, учеными Е. И. Орловым, В. А. Терещенко, А. С. Френкелем был разработан шлакощелочной бесклинкерный цемент с использованием активизатора твердения на основе растворимого стекла.

Исследователями Б. Р. Скрамтаевым и пр., была отмечена высокая эффективность полученных вяжущих. Кроме того, показана экономическая целесообразность производства данных цементов по сравнению с портландцементом.

Затворенные жидким стеклом вяжущие на основе доменного гранулированного шлака обладают высокой активностью и прочностью на сжатие. Данный факт доказали ученые В. В. Константинов и Г.Т. Пужанов, которые получили шлакосиликатное вяжущие с активностью 40 – 60МПа. Как отмечают авторы исследования, продуктами реакции обмена в которой участвует затворитель в виде жидкого стекла и доменный шлак являются устойчивые гидросиликатные образования, в частности алюмосиликаты натрия [94,95].

В результате исследований В. И Уткина были получены высокопрочные композиты на основе доменного гранулированного шлака и растворимого стекла, обладающие прочностью при сжатии равной 80МПа. Исследователь отмечает, что в результате химической реакции жидкого стекла и вяжущего, гидратные новообразования возникают только на поверхности частиц доменного шлака, в то время как их разрушения не происходит. Кроме того, тонкодисперсные частицы шлака в вяжущей системе действуют как мелкий наполнитель [96,97]

Работами по исследованию вяжущих свойств систем состоящих их доменных гранулированных шлаков и растворимого стекла изучали исследователи С. А. Сухоруков и Е. И. Климанова. При этом в работах последней освещался также вопрос использования отвальных шлаков для производства высокоэффективных композитов [98–100].

За рубежом исследования по щелочной активации доменных шлаков проводил немецкий ученый Кюль в 1930 годах [54]

Большой вклад в разработку вяжущих щелочной активации за рубежом внесла работа Пурдона проводившаяся в 1940-х годах. Автор использовал доменный шлак, активированный гидроксидом натрия. По его данным процесс гидратации проходил в два этапа: на первом этапе происходило высвобождение гидроалюмосиликата и гидроксида кальция. После этого должно было происходить формирование гидратов кремния и алюминия, а также регенерация щелочного раствора. Автор считал, что гидроксиды щелочных металлов выступают в роли катализаторов, доказав это утверждение путем выщелачивания гидроксидов щелочей в том же количестве, как и в исходной смеси [55].

Основополагающими работами в области вяжущих щелочной активации считаются работы В.Д. Глуховского. Автор впервые исследовал связующие использованные при строительстве древнеримских построек и египетских пирамид. Он пришел к выводу, что древние постройки состоят их алюмосиликатных соединений, гидратов кальция, которые являются основой также и для порландцементного клинкера, кроме того, полученные результаты свидетельствуют о наличии в составе композитов минерала анальцита, что объясняет их высокую прочность и долговечность.

Проведенные Глуховским исследования по активации доменных шлаков показали: что продуктами гидратации шлаков, в основном, являются гидросиликат кальция, гидроалюмосиликат кальция и натрия. Кроме того, в результате проведенных исследований по шлакощелочной активации

глинистых минералов показали, что продуктами таких реакций является гидросиликат алюминия (цеолит) [53,101,102].

В работе [53] щелочные активаторы делятся на шесть групп: щелочи, соли слабых кислот, силикаты, алюминаты, алюмосиликаты и соли сильных кислот.

В.Д. Глуховский, впервые ввел понятие «грунтосиликат», который в дальнейшем назовут геополимербетоном.

Советскими учёными: П. В. Кривенко, Е. К. Пушкаревой, Р. Ф. Руновой был выполнен целый ряд исследований в области получения высокоэффективных специальных шлакосиликатных вяжущих веществ. Среди их разработок можно найти высокопрочные, быстротвердеющие, жаропрочные, безусадочные, коррозионностойкие, тампонажные композиции на основе шлакосиликатных вяжущих веществ. Отмечается также их высокая экономическая эффективность. Было установлено, что удельные капиталовложения на производство таких вяжущих, в среднем, в 2–3 раза ниже, чем при производстве цемента [103–106]

Из зарубежных исследователей, вяжущих щелочной активации, можно отметить Д. Давидовича, который в 1980 году впервые ввёл термин «геополимер». В том же году ученым была получена активная смесь, содержащая прокаленный каолинит, известняк и доломит [107,108].

С 1990 года интерес к вяжущем щелочной активации резко вырос, поскольку эти материалы способны сократить выбросы CO_2 в атмосферу. По данным Д. Давидовича, выбросы в атмосферу углекислого газа от производства шлакощелочных вяжущих находятся на уровне 0,18 тонн, что в 5 раз меньше, чем при производстве портландцементного клинкера [109].

По мнению Д. Давидовича пирамиды Египта были изготовлены не из натурального камня, а из искусственных материалов, сделанных руками человека. На основании проведенных исследований ученый сделал следующий вывод: блоки пирамид были сформированы из смеси гидроксида, известняков, воды и карбоната натрия. В исследованиях Д. Давидовича было

установлено, что блоки пирамид были созданы не из окаменелых слоёв кальция, а ориентированы случайным образом, как в искусственном связующем. Рентгенофазовый анализ образцов показал наличие в составе большого количества фазы CaCO_3 , но также были обнаружена и аморфная составляющая алюмосиликатного и цеолитосодержащего состава ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [110].

По данным, полученным В. Д. Глуховским процессы протекающие при формировании структуры шлакосиликатных вяжущих систем схожи с процессами формирования некоторых горных пород в природе. По мнению ученого механизм щелочной активации состоит из объединённых реакций разрушения и конденсации, которые включают разрушение основного материала на более мелкие низкостабильные структурные единицы, которые способны коагулировать частицы противоположных зарядов, создавая условия для их агрегации. Полученные в результате агрегирования продукты представляют собой коагулированные смеси или гели, которые в дальнейшем, в щелочной среде, могут приводить к формированию щелочных соединений, в том числе и кристаллической структуры [53].

Рассматривая вопрос структурообразования шлакосиликатных вяжущих веществ в присутствии кремниевой кислоты, было замечено, что ионы положительно заряженных металлов, в их числе соединения железа, алюминия и хрома могут коагулировать отрицательно заряженные гидрозоли кремниевой кислоты. При этом противоположно заряженные частицы нейтрализуют, друг друга уменьшая заряды до определенного предела, создавая предпосылки для их агрегации. Образующиеся в результате агрегирования гидрозолей гели, представляют собой водостойкие соединения, глевидные частицы которых способны адсорбировать щелочные ионы, в результате чего образуются щелочные соединения как аморфной, так и кристаллической структуры [53,71].

Гидравлические свойства также проявляет система, в которой присутствуют гидроксиды щелочноземельных металлов, в том числе

гидроокиси кальция стронция и бария. Образующиеся гелевидные новообразования в результате коагуляции кремне и алюмосолей, в системах, содержащих щелочноземельные металлы имеют вид: $R_2O \cdot RO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO \cdot H_2O$ [53].

Ученые Кризан и Живанович [93] исследуя тепловыделения в активированном щелочью доменном шлаке пришли к выводу, что на процессы гидратации оказывает влияние содержание натрия и силикатный модуль. Было установлено, что повышение уровня Na_2O и силикатного модуля вызывает интенсификацию процессов гидратации. По мнению авторов процесс гидратации начинается с разрушения шлаковой фазы (Ca-O; Mg-O; Si-O-Si; Al-O-Al и Al-O-Si) под действием щелочей. Затем происходит формирования Si-Al слоя по всей поверхности зерен шлака, и наконец, происходит образование продуктов гидратации.

Исследователи Ли и Девентер [111] отмечают, что одним из различий между вяжущими на основе портландцемента и связующими щелочной активации, является то что в первом случае используется затворитель, вода с нейтральным рН, который медленно становится щелочным (рН 12-13). В случае шлакосиликатных вяжущих для начала процесса гидратации необходимы высоконцентрированные растворы щелочей. Кроме того, авторы отмечают, что для достижения высоких физико-механических характеристик получаемого композита необходимо использовать активизаторы с содержанием диоксида кремния (силиката натрия), но поскольку данные растворы имеют высокий рН, это может предотвращать коагуляцию и полимеризацию силикатов. В результате растворения исходных материалов понижается рН вплоть до значения равного 14, процессы конденсации проходят очень быстро. Затем, в конечном продукте, происходит группа реакций, включающих коагуляцию, образование коллоидов и отверждение нерастворенных алюмосиликатных частиц в аморфной алюмосиликатной структуре.

Множество исследований было проведено для изучения конечных продуктов гидратации шлакосиликатных вяжущих систем.

К примеру, учеными в работе [112] было установлено, что продуктами гидратации доменного шлака являются гидросиликаты кальция (CSH) и ксонотлит.

Работой ученый Ванга и Скривенера [66] подтверждается, что CSH гель является основным продуктом гидратации таких вяжущих. Кроме того, учеными было отмечено низкое отношение C/S. Данный факт можно объяснить высоким pH раствора, что ведет к низким значениям концентрации Ca и высоким Si.

В работе [73] среди продуктов гидратации обнаружили большое количество цеолитовых фаз (тоберморит, гидроксисодалит) и Na-P1 (гисмондит) что, возможно, связано с высоким соотношением вода/вяжущее ($V/V = 1$), поскольку избыток воды является решающим аспектом в кристаллизации $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$.

По мнению ученых [113,114] продуктами гидратации шлакосиликатных вяжущих являются низкосновы гидросиликаты кальция, кремневые кислоты, щелочноземельные и щелочные гидроалюмосиликаты, кальцит и др. Содержащиеся в составе исходного вещества ионы Ca^{2+} совместно со щелочными алюмосиликатами дают предпосылки для формирования цеолитов смешанного состава.

Исследованиями [71,115,116] было отмечено, что наличие цеолитовых фаз и соединений в составе новообразований, а также их низкая основность, определяют высокие физико-механических показатели композитов на основе шлакосиликатных вяжущих.

Некоторые исследователи [66,117] отмечают, что среди продуктов гидратации шлакосиликатных вяжущих гидратированных соединений на основе натрия (цеолитового состава) не обнаружено. Объясняется это тем, что соединения натрия находятся в CSH геле, что может подтверждаться

низким соотношением C/S. Это, в свою очередь, означает замену иона Na^+ на Ca^{2+} .

Другие авторы [118,119] также выявили, что количество натрия внутри CSH фазы увеличивается вместе с уменьшением отношения C/S. Иногда количество натрия довольно велико, вследствие чего гель называют NCSH.

Броу и Аткинсон в своей работе [67] изучали продукты реакции шлакосиликатных вяжущих на основе доменного шлака и сообщили, что рентгенофазовый анализ не показывает кристаллических продуктов, однако анализ с помощью электронного микроскопа показывает образование гидротальцита через месяц твердения.

Другие авторы в работе [120] также изучали продукты гидратации доменных шлаков. Полученные результаты также свидетельствуют о получении в качестве продуктов реакции гидросиликатов кальция (CSH) и гидротальцита.

В работе [121] отмечается, что основным продуктом гидратации шлакощелочных вяжущих на основе доменного гранулированного шлака является CSH гель с незначительными количествами гидротальцита, который формируется только тогда, когда шлак достигает высокого уровня гидратации.

Пуэртас и др. [122] изучали доменный шлак активированный NaOH. При помощи рентгеноструктурного анализа было установлено наличие в составе продуктов реакции гидротальцита с формулой: $\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, кальцита и CSH.

На основе исследований многих Российских и зарубежных ученых была доказана эффективность применения шлакосиликатных вяжущих веществ для производства высокоэффективных композиционных материалов.

Шлакосиликатные бетоны имеют класс прочности от B10 до B110, морозостойкость F300-F1000, водопроницаемость не ниже W8, а также обладают высокой атмосферостойкостью [53,71,75].

Композиты, изготовленные с использованием шлакосиликатных вяжущих благодаря уникальной природе физико-химических процессов, протекающих при твердении, а именно образовании низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция и магния отличаются высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред.

Показанные преимущества шлакосиликатных не оставляют сомнения в перспективности проведения исследований в данной области и внедрению новых разработок. Которые могут быть использованных в различных областях строительства.

1.3. Некоторые аспекты формирования ячеистой структуры поризованных композиционных шлакосиликатных арболитов

Поризация композиционных материалов, в том числе и арболита может осуществляться несколькими путями: с помощью технической пены и различными порообразующими, и воздухововлекающими добавками.

Оптимальным считается способ поризации с помощью технической пены. Данный способ позволяет получить композит высокого качества за счет стабильной ячеистой структуры высокой прочности.

За последние 10 лет рост строительного сектора обуславливает высокий спрос на строительные материалы, в частности пенобетон. Причина популярности пенобетона кроется в его пористой структуре, получаемой в процессе добавления технической пены в подготовленный цементно-песчаный раствор. Помимо этого, простота технологии производства пенобетона дает возможность выпускать продукцию в стационарных условиях и на мобильных мини заводах. Идея производства пенобетона принадлежит ученому Байеру, который в 1925 году запатентовал свою технологию [123,124].

На сегодняшний день исследованием пенобетона занимаются множество ученых во всем мире. В нашей стране работы в сфере ячеистых бетонов в основном принадлежат школам под руководством: Г. П. Сахарова, М.С.

Гаркави, У. М. Махамбетовой, Л.Б. Сватовской, А.С. Коломацкого и др., J. Jun и др., Z. Zhang, J.L. Provis, N. Narayanan, а также многие другие ученые в России и за рубежом.

С точки зрения экономии затрат на производство и более простой технологии изготовления наиболее эффективными являются неавтоклавные ячеистые бетоны. Несмотря на это, сложность контроля технологических параметров при производстве такого вида бетонов: количества и качества материалов, водотвердного отношения, РН сред и др., при простоте технологии изготовления неавтоклавного пенобетона приводит к значительным трудностям в процессе регулирования физико-механических свойств и параметров структуры получаемой продукции.

В процессе формирования структуры ячеистых пенобетонов роль пены сводится к созданию несущего каркаса, в котором твердые частицы раствора находятся во взвешенном состоянии с помощью сил вязкого трения. Качество таких композитов зависит от кратности, дисперсности и устойчивости пен, на которые оказывает влияние размер и форма пузырьков, толщина пленок и другие факторы [124,125].

Улучшение качества пенобетонной продукции сводится к обеспечению устойчивости пены и пенобетонной смеси, и, следовательно, его однородной стабильной ячеистой структуры, низкой теплопроводности и высокой прочности. Также при постоянном значении плотности увеличение прочности может быть обеспечено лишь за счет качественного улучшения структуры пенобетона и повышения прочности его матрицы. [126–128].

Перспективной технологией изготовления пенобетона является применение ускорителей твердения, а также быстросхватывающихся и быстротвердеющих вяжущих. К данным вяжущим относится также шлакосиликатное вяжущее. Для этого вида вяжущих характерна высокая прочность в значениях от 80 до 120МПа и высокий темп набора прочности на ранних этапах. Данные свойства в значительной степени способствуют сохранению структуры пенобетона [124,129].

Устойчивость, дисперсность и кратность технической пены оказывают влияние на качество ячеистой структуры. Объемное соотношение жидкой и газовой фаз определяет параметры структуры пен. Существуют три типа формы пузырьков и ячеек пены. Первый тип относится к сферической (шаровой) форме ячеек. В этом случае пузырьки пены разделены довольно толстыми пленками жидкости. Ко второму виду структуры относится полиэдрическая или многогранная форма пузырьков. Данная структура возникает при высокой объемной доле газовой фазы. Также существует и третья, промежуточная форма, так называемое переходное состояние от сферической к полиэдрической форме. Данные микрогазовые эмульсии характеризуются скоплением газовых пузырьков. По мере увеличения газовой составляющей в объеме, изменяется как форма ячеек, так и толщина их пленок [126,130,131].

Для приготовления качественного ячеистобетонного композита стремятся получить полиэдрические пены. Форма ячеек данных пен похожа на многогранник. На основании этого пена рассматривается в качестве системы, объем которой заполнен более или менее правильными многогранниками. Данные пены могут быть сформированы в процессе обезвоживания пен первого типа (шаровых), а также путем использования маловязких растворов пенообразователей [130,132].

Геометрия полиэдрических пен представляет собой структуру, состоящую из многогранников, где в каждом ребре многогранника сходящиеся пленки пузырьков образуют равные 120° углы [124,133].

Если рассматривать поперечное сечение полиэдрической пенной системы, то можно увидеть, что пленки соединяющихся пузырьков в каждом угле образуют утолщение в виде треугольника называемого границей Плато или Гиббса. Образующиеся каналы проходят через всю пену создавая сообщающуюся, взаимосвязанную систему, где вершины многогранников являются узлами образовавшейся системы [130,134,135].

Разность показателей давления в системе, порождает два типа явлений: первый тип относится миграция межпоровой жидкости в каналах Плато и диффузия газа между пузырьками [130,135]

Процесс выдавливания жидкости из пленки на границу Плато происходит в связи с тем, что жидкость в более толстых участках пленки испытывает меньшее давление [136].

Значительное влияние на процесс осушения пены и её устойчивость оказывает истечение жидкости на границу Плато. Под действием силы тяжести происходят процессы стекания жидкости из верхних слоев к нижним, из-за чего происходит истончение пленки [126,136,137].

Рассматривая процессы формирования пены в трехмерном пространстве, необходимо рассмотреть контакты пузырьков друг с другом. Число граней в пузырьке колеблется от 8 до 18 и в среднем составляет 13,7. При соединении в одной вершине четырёх пузырьков пены они образуют четырехгранный угол, который равен $109^{\circ}29'$. В процессе рассмотрения вопроса устойчивости пен необходимо выделить два фактора. Первый фактор основан на следующем предположении: все действующие и результирующие силы на каждую грань, вершину или границу Плато равны нулю. Второй фактор устойчивости тесно связан с компенсацией этих результирующих сил изменением локального давления внутри капилляров и стенок, которые разделяют ячейки. Изменения давления оказывают значительное влияние на механизмы осушения пен, из-за чего пленки утончаются и приводят к разрушению пены [126,130].

Процесс разрушения пены начинается с самых верхних ячеек, под действием различных сил, в том числе силы тяжести. При этом объём пены стремительно уменьшается [137].

Помимо этого, разрушению пены в некоторых случаях предшествует разрушение перегородок. При увеличении размера газовых пузырьков объём пены снижается. Разрушению ячеек также способствует диффузия газа через перегородки и ламеллы, разделяющие ячейки.

Ухудшение свойств пены приводит к ухудшению строительно-технических характеристик бетона. Поэтому вопрос улучшения технических характеристик пены и её устойчивости является очень важным для рассмотрения.

Учёный Гиббс [126] считает, что основополагающей характеристикой устойчивой пенной пленки является её устойчивость к механическому воздействию, то есть упругость пленки.

Данное свойство рассматривал в своей работе ученый Гиббс [124]. Свойство описывается уравнением 1.1:

$$E = \frac{2d\gamma}{d\ln A} \quad (1.1)$$

Где параметры A – площадь пенки; γ – поверхностное натяжение.

В работах Адамсона [134] для двухкомпонентных систем уравнение упругости представлено в следующем виде (1.2):

$$E = 4(\Gamma_2^1)^2 \left(\frac{d\mu_2}{dm_2} \right) \quad (1.2)$$

Где Γ_2^1 – поверхностный избыток компонента 2; μ_2 – химический потенциал этого компонента; m_2 – количество компонента в единицу площади пленки.

Значение «Е» характеризует способность пенной ламеллы изменять поверхностное натяжение на момент приложения сжимающего или растягивающего усилия. На момент растяжения пленки концентрация ПАВ в пене падает, из-за чего поверхностное натяжение, которое препятствует разрыву пленки, возрастает. В чистых жидкостях значение «Е» равно нулю, поэтому в них устойчивых пен не образуется.

В процессе рассмотрения уравнения (2) можно сделать вывод о том, что величина «Е» может иметь большое значение лишь при условии большой величины составляющих его переменных. Другими словами, концентрация ПАВ должна иметь оптимальные значения, то есть не быть слишком большой или низкой.

При создании технической пены для пенобетона часто применяют специальные добавки стабилизаторы пены. К ним относятся: древесно-омыленная смола (СДО), жидкое стекло, сернокислое железо и др. Помимо этого, добавки могут быть в виде твердых частиц – известь, микрокремнезем тонкодисперсный портлендцемент, тонкодисперсные золы ТЭС и др. Тонкодисперсные минеральные добавки снижают скорость стекания жидкости на границу Плато, а также способствуют изменению состояния пленки в псевдотвердое за счет схватывания [124,138,139].

В жидком виде стабилизирующие добавки полезно вводить в состав раствора пенообразователя. Это позволяет получать пену с высокими физико-механическими характеристиками. Также стабилизатор пены в жидком виде целесообразно дополнительно вводить в смеситель одновременно с минеральными элементами (цемент, шлак, гипс и т.п.), что в значительной степени улучшает физико-механические характеристики пены и коэффициент использования порообразующей способности пенообразователя.

Добавки стабилизаторы минерального типа стоит применять лишь для приготовления пены пенобетоносмесителей миксерного типа, поскольку при этом методе получения пены обеспечивается наиболее эффективное её применение. Также наиболее продуктивными с точки зрения технологии и качества получаемого продукта являются пеновсбиватели принудительного типа с единовременным циклом перемешивания бетонной смеси и получения пены. Полученные в результате данных действий пеноцементные составы характеризуются высокими строительно-техническими свойствами и более низким водосодержанием относительно бетонов, изготовленных на основе технической пены [123,126].

Технология изготовления пенобетонных смесей не может быть применена для приготовления шлакосиликатных пенобетонов, так как они содержат большое количество силикатного затворителя [124].

В процессе поиска необходимого пенообразующего компонента вяжущего следует помнить, что некоторые пенообразователи могут быть несовместимы с элементами данного вяжущего. Данная несовместимость может привести к различным деструктивным явлениям, в том числе и гашению пены. Например, применение окиси амина в роли пенообразователя для приготовления пенобетона на основе портландцемента приводит к коагуляции частиц вяжущего. Данный процесс приводит к ухудшению строительно-технических характеристик получаемого композита [126,140,141].

Гашение пены наблюдается в процессе применения в качестве пенообразователя Пенострома для изготовления шлакосиликатного пенобетона.

Для шлакосиликатного пенобетона наиболее эффективными пенообразователями являются синтетические пенообразователи (окись амина, лаурилсульфат натрия и пр.). Недостатком данного вида пенообразователей является их высокая водопотребность, что оказывает негативное влияние на структуру композита проявляющееся в высоких значениях деформаций усадки, а также высокой трещиностойкости бетона, особенно для составов шлакосиликатного пенобетона изготовленных на низко модульном жидком стекле [124][142].

В исследовании [124] для повышения трещиностойкости шлакосиликатного пенобетона и снижения негативного влияния деформаций усадки использовались зола ТЭС, щелочностойкое стекловолокно, микрокремнезем и поверхностное армирование стеклосеткой. Также для сохранения поровой структуры применялись минеральные добавки модификаторы, а также различные ускорители твердения. Установлено, что применение данных приёмов позволяет значительно повысить характеристики пенобетона, в частности уменьшить в два и более раза деформации усадки шлакосиликатных поризованных композитов.

Кроме того, проведенные в работе [124] исследования теплопроводности шлакосиликатных пенобетонов показывают, что данные материалы характеризуются пониженными (в среднем на 10–20%) по сравнению с пеноцементными композитами показателями теплопроводности. Кроме того, зависимость показателя теплопроводности от плотности имеет линейный характер и может быть аппроксимирована с помощью уравнения 1.3.

$$\lambda = 0,00184\rho + 0,33 \quad (1.3)$$

Где ρ – плотность бетона измеряемая в кг/м^3

При этом показатель точности при определении коэффициента теплопроводности бетонов с плотностями от 200 до 300 кг/м^3 по уравнению 1.3, составляет 1,2%.

Кроме того учеными в работе [124] было отмечено, что бетоны на основе шлакосиликатного вяжущего и технической пены с оптимальными характеристиками, обладают высокой огнестойкостью и могут применяться в строительстве в роли огнеупорного материала вместо жаростойкого бетона, шамотного огнеупорного кирпича и др. Применение данного вида материала также ведет к снижению издержек в 1,5-2 раза, а также к снижению цены ремонта печей для обжига более чем в 2 раза.

Изученная в РОСРИАЦ экологическая эффективность шлакосиликатных пенобетонов, в том числе с добавкой золы ТЭС22 в количестве 20%, показала следующее: изделия из данного бетона могут иметь широкое применение в сфере строительства.

Выводы по Главе 1

1. В результате анализа литературных источников были получены данные позволяющие утверждать, что органические заполнители такие как древесная щепа, в том числе различные отходы древесины, получаемые в результате действия предприятий деревообрабатывающей промышленности,

являются эффективными компонентами композиционных арболитовых материалов высокого качества. Кроме того установлено, что поризация арболитовой является эффективным методом улучшения его свойств (прочности, плотности, водопоглощения и тп.). В частности, введение технической пены с оптимальными характеристиками, позволяет получить арболитовый материал с более низкими показателями теплопроводности и водопоглощения, а также повышенным модулем упругости и прочности при сжатии по сравнению с арболитовым композитом без добавления пены. Несмотря на это было установлено, что получение композиций на основе портландцемента и органического заполнителя в виде древесины затруднено из-за повышенной химической агрессивности последнего, а также его низкой адгезией указанного органического заполнителя к цементному камню.

2. Высокоэффективные арболитовые материалы могут быть получены при использовании шлакосиликатных вяжущих веществ на основе щелочного активизатора твердения и тонкомолотых доменных гранулированных шлаков.

3. Установлено, что наиболее эффективными компонентами для получения шлакосиликатных вяжущих веществ с высокими физико-механическими и строительно-техническими свойствами являются тонкомолотые доменные гранулированные шлаки и жидкое стекло. Кроме того, более высокой гидравлической активностью обладают шлаки, у которых модуль основности больше единицы. При этом наблюдается прямо пропорциональная зависимость активности шлаков от значения модуля основности.

4. Полученные из разных источников данные позволили установить, что новообразования, образующиеся при твердении шлакосиликатных вяжущих в присутствии щелочного активизатора, в том числе жидкого стекла относятся, в основном, к группе низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов различного состава. Полученные на основе шлакосиликатного вяжущего композиты отличаются высокими

физико-механическими свойствами (прочность, водостойкость, морозостойкость) а также низкой теплопроводностью, что делает их серьёзными конкурентами аналогам, изготовленным на основе портландцемента.

5. Самыми эффективными пенообразователями для шлакосиликатного пенобетона являются синтетические пенообразователи: окись амина, лаурилсульфат натрия и пр. Установлено, что добавки модификаторы (древесно-омыленная смола (СДО), жидкое стекло, сернокислородное железо и др.), а также стабилизаторы минерального типа, способны улучшать свойства технической пены. Применение добавок стабилизаторов позволяет значительно повысить характеристики пенобетона, в частности уменьшить в два и более раза деформации усадки шлакосиликатных порисованных композитов.

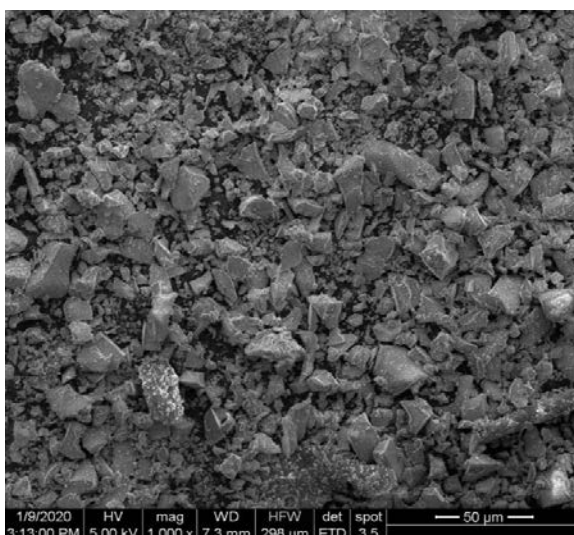
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы

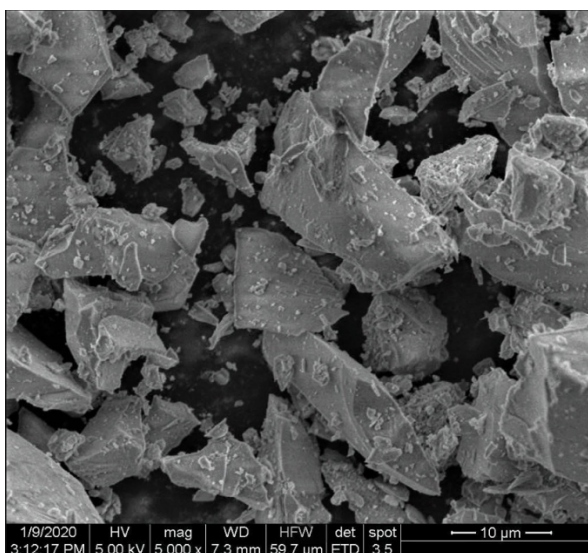
Доменный гранулированный шлак – основной компонент исследования, который использовался в качестве вяжущего вещества для производства арболита. Доменный гранулированный шлак – это отход производства черной металлургии. Данный отход производства был предоставлен крупной российской компанией ПАО «Мечел» (Москва, Россия). Образцы данного отхода были исследованы с использованием рентгенофазового (РФА), электронно-микроскопического (РЭМ), химического и гранулометрического анализов.

В результате проведенного РФА анализа было установлено следующее: в состав доменного гранулированного шлака входит 85% и более аморфной фазы. В то время как кристаллическая фаза представлена минералом Акерманит с химической формулой: $Al_{0.99}Ca_2Mg_{0.46}O_7Si_{1.52}$.

РЭМ анализ образца шлака показал, что материал состоит, в основном, из крупных утолщенных частиц неправильной формы и их агрегатов, диаметры которых от долей мкм до нескольких мкм. При этом агрегации подвержены более тонкодисперсные частицы. Фотоснимки, полученные с помощью РЭМ при увеличении $\times 1000$ и $\times 5000$, представлены, соответственно на рисунке 2.1 и 2.2.



**Рисунок 2.1 – Электронная микроскопия образца
молотого шлака (x 1000)**



**Рисунок 2.2 – Электронная микроскопия образца
молотого шлака (x 5000)**

Результаты химического анализа образца молотого шлака представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты химического анализа молотого шлака

Mg	Ca	Si	Al	K	Ti	S	п.п.п
37,69	24.66	23.19	12.10	0.926	0.592	0,321	0,518

В результате проведенных исследований было установлено, что содержание оксида серы (SO_3) для образца шлака находится на уровне 1,53% масс. В то же время массовая доля содержания оксида магния находится на уровне 10,61%. Кроме того, было определено значение суммы щелочных оксидов ($\text{Na}_2\text{O}+0.65\text{K}_2\text{O}$) равное 0,86% масс. Также была определена массовая доля содержания основных оксидов CaO , MgO и SiO_2 . Данное значение представлено в виде суммы основных оксидов ($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2$) и находится на уровне 81,15%. Отношение массовых долей данных оксидов ($(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$) находится на уровне 1,27.

Результаты эксперимента по определению гранулометрического состава доменного гранулированного шлака показали, что образец шлака содержит в основном (85,03%) тонкодисперсные частицы с размерами от 2 мкм до 45,022 мкм. Количество частиц с размерами менее 2 мкм составляет долю 14,97%. Средний размер частиц доменного гранулированного шлака составляет 11,073 мкм. На рисунке 2.3 показано дифференциальное и интегральное распределение частиц доменного гранулированного шлака по размерам.

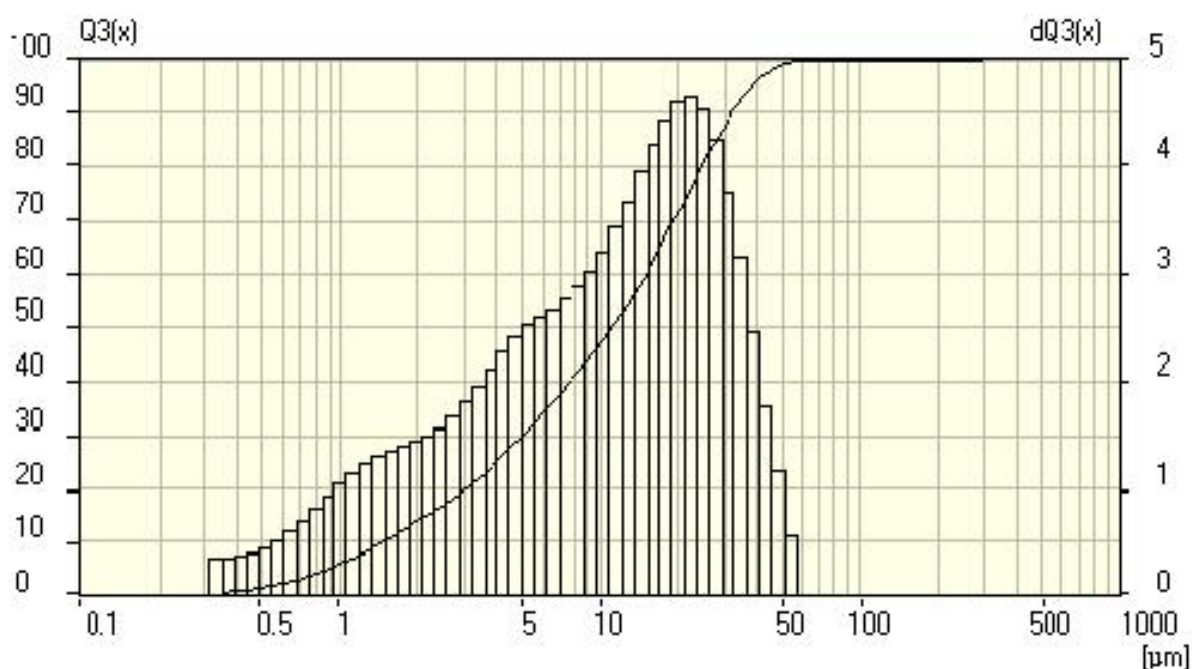


Рисунок 2.3 – Дифференциальное и интегральное распределение частиц доменного гранулированного шлака по размерам

Также были определены основные физические свойства образца шлака, которые представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Физические свойства молотого шлака

Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Влажность, %	Проход через сито №0045, %	Удельная поверхность, м ² /кг
1880	2940	0,5-1,5	99,9%	517

В роли затворителя был задействован раствор модифицированного жидкого стекла ООО «ПРОМСТЕКЛОЦЕНТР» (Екатеринбург, Россия) со следующими свойствами: массовая доля SiO₂– 19,95%; плотность – 1,31 г/см²; массовая доля Na₂O – 10,35%.

Для изготовления арболита была применена древесная щепа хвойных пород на основании ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия», со следующими свойствами: насыпная плотность – 120 кг/м³. Доля влажности – 12%. Водопоглощение древесины по массе W_m – 165%.

Для приготовления технической пены в роли пенообразователя был использован пенообразователь «ПБ Люкс» производства компании РХЗ «НОРДИКС» (Воскресенск, Россия) со следующими свойствами: рН (водородный показатель продукта) равен 8,0–10,5; плотность при 20°C составляет от 1040 до 1100 кг/м³.

Также в качестве пенообразующей добавки использовался концентрированный раствор протеинового пенообразователя «Эталон», произведенный в соответствии с ТУ 2483-003-13420175-2015 компанией ООО «Аист», г. Челябинск. Раствор пенообразователя обладает следующими свойствами: водородный показатель рН = 6.5–8.0; плотность при 20°C – 1120 кг/м³; Температура застывания – (- 25) °C.

В качестве стабилизатора пены применялась бентонитовая глина с долей монтмориллонита не менее 85%. Изготовила компания ООО «Бентонит Хакасии» (Черногорск, Россия) на основании ТУ 2164-005-49215611-2007. Бентонитовая глина была задействована в роли добавки стабилизатора технической пены. Для образца глины был определен её гранулометрический состав. Интегральное и дифференциальное распределение частиц бентонитовой глины по размерам показано на рисунке 2.4.

Объемная доля частиц бентонитовой глины, в зависимости от их размеров представлена в таблице 2.3.

Также в роли стабилизатора пены применялся гуamat натрия с долей гуминовых кислот не менее 40%.

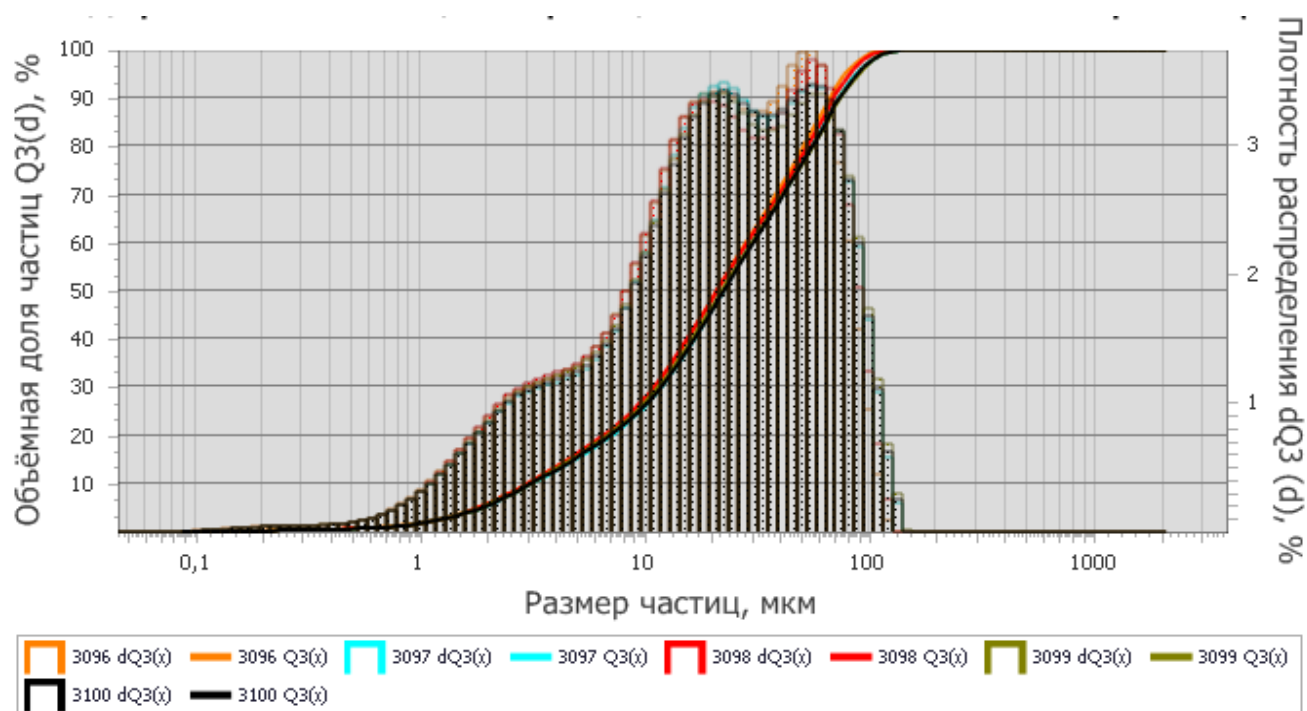


Рисунок 2.4 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц бентонитовой глины по размерам

Таблица 2.3 – Объемная доля частиц бентонитовой глины в зависимости от их размеров

Объемная доля частиц Q3(d), %	Размер частиц d, мкм	M3096	M3097	M3098	M3099	M3100
10	3,1	3	3,2	3	3,1	3,2
50	21,74	21	22,3	20,9	22	22,5
90	72,27	66,9	74,2	70	75,5	74,7

2.2. Методы

2.2.1. Физико-химические методы исследования материалов

Физические свойства доменного гранулированного шлака были определены в соответствии с ГОСТ 3476–74 («Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов»), а также ТУ 0799-001-99126491-2013 («Шлак доменный гранулированный молотый»).

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре "D8 Advance" (Bruker AXS, Германия) в следующих условиях: рентгеновская трубка – медная (CuK α -излучение) с никелевым фильтром. Напряжение рентгеновской трубки составило 40 кВ, ток – 40 мА, воздействие – 1.1 час, скорость вращения гониометра – 4 град/мин; диаметр образца – 10 мм; постоянная времени – 1,0 сек; скорость отсчета импульсов – 1·10⁴ имп./с.

РЭМ анализ выполнялся с использованием растрового электронного микроскопа «FEI Quanta 200», со следующими характеристиками: ускоряющее напряжение на уровне 100 В – 30 кВ; максимальное увеличение – до 100000 крат; разрешение EDX детектора – 129 эВ на линии Ca(Mn);

сверхвысокое разрешение – до 1 нм (при 20 кВ и рабочем расстоянии 2 мм), скорость счета составляет до 100000 имп/с.

Исследование термического поведения образца проводилось на приборе: «SETARAM LABSYS TGA/DSC/DTA». Рабочий диапазон температур прибора до 1000 °С. Максимально доступная для проведения измерений температура – 1600 °С. Условия проведения эксперимента: материал тигля – Al_2O_3 (Корунд), интервал температур от 50°С до 900°С, атмосфера – воздух, предварительный нагрев: стабилизация температурного потока на 50°С, скорость нагрева (const) – 10°С/мин.

Химический анализ проведен посредством рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра «ARL OPTIM X 200W» со следующими характеристиками: анализируемые элементы: F – U; мощность рентгеновской трубки – 0,2 кВт; напряжение питания – 230 В; относительное СКО выходного сигнала не более 1,0 %.

Гранулометрический состав шлака был оценен на приборе по определению размера частиц от компании «FRITTSCH» модели «ANALYSETTE 22» со следующими свойствами: напряжение – 100-240 В/1~; диапазон измерения: 0,5 – 1500 мкм; частота – 50–60 Hz; Потребляемая мощность составила 50 Ватт.

Инфракрасная спектроскопия композиционного материала проводилась на ИК-Фурье-спектрометре «Agilent Cary 630», в следующих условиях: спектральное разрешение: $< 2 \text{ см}^{-1}$; спектральный диапазон: 350 см^{-1} – 7000 см^{-1} . Правильность волнового числа: $0,05 \text{ см}^{-1}$ при измерениях на основании стандарта NIST 1921. Воспроизводимость волнового числа составила $0,005 \text{ см}^{-1}$ при измерениях на основании стандарта NIST 1921. Питание: от 110 до 240 В, 60 или 50 Гц.

С целью исследования кинетики гидратации шлакосиликатного вяжущего с использованием натриевого жидкого стекла в роли затворителя, были произведены два образца: контрольный (раствор пенообразователя

отсутствовал) и исследуемый (с добавлением раствора пенообразователя концентрацией 3,3% в количестве 0,35% от массы вяжущего). Кинетика гидратации вяжущего была исследована с применением метода изотермической калориметрии на приборе TAM Air 3116–2, TA Instruments, со следующими свойствами: диапазон измерений составил значения: 5 – 90°C, 0 – 10000 кВт, 0 – 1000 кДж, погрешность: $\pm 0,2$ °C, ± 20 мкВт.

Для установления сроков схватывания шлакощелочного вяжущего и нормальной густоты была задействована методика, указанная в ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема». Марка по прочности шлакосиликатного вяжущего была определена в соотношении 1:3 на основании ГОСТ 310.4–81 «Цементы Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». В экспериментах по установлению марки вяжущего был использован стандартный полифракционный песок в соответствии с ГОСТ 6139–2003 «Стандартный полифракционный песок для испытаний цемента».

Определение значения теплопроводности было реализовано стационарным способом на приборе ИТП-МГ4 производства компании СКБ «Стройприбор» (Челябинск, Россия). Диапазон измерения прибора составляет от 0,04 до 0,8 Вт/м°C. Для определения параметров теплопроводности были созданы шесть образцов шлакосиликатного поризованного арболита с маркой по плотности D600 и размерами 10x10x2см. Обобщенный показатель теплопроводности (Вт/м°C) был принят в качестве среднего арифметического шести измерений.

При высушении шлакосиликатного поризованного арболита определение усадки производилось согласно ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

2.2.2. Подбор состава композиционного арболитового материала

Подбор состава арболита был реализован расчетно-экспериментальным способом на основании данных, представленных в ГОСТ 19222–2019 («Арболит и изделия из него»), а также руководствуясь рекомендациями по расчету и производству изделий из поризованного арболита, разработанных НИИЖБ Госстроя СССР.

Кроме того, для оценки влияния расхода основных компонентов: древесной щепы хвойных пород и доменного гранулированного шлака на прочность и плотность шлакосиликатного поризованного арболита был подобран состав методом математического планирования эксперимента. В программном комплексе «Градиент» с помощью стандартного плана эксперимента, а именно двухфакторного композиционного эксперимента (квадратичная регрессия два фактора), был произведен расчет математической модели.

Для определения физико-механических свойств композиционного арболитового материала изготавливались образцы с размерами: 4х4х16см и 10х10х10см. Образцы были изготовлены в лабораторных условиях при комнатной температуре и естественной относительной влажности воздуха. Замесы производились вручную с использованием стандартной чаши и лопатки для перемешивания цементного теста на основании ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема», а также емкости объемом 20л и строительного миксера марки «Bort ВРМ-1400×2», с двумя насадками и мощностью равной 1400 В.

Укладка арболитовой смеси в формы осуществлялась в два слоя с уплотнением каждого из слоев методом штыкования, после чего производилось дополнительное уплотнение смеси в формах на вибростоле в течение 10–15 секунд. Распалубка образцов производилась через 24 часа с момента укладки арболитобетонной смеси в формы.

Образцы хранились в лабораторных условиях при комнатной температуре и относительной влажности воздуха на уровне 90%.

Техническая пена была изготовлена с использованием измельчителя марки «BOSH» со следующими свойствами: объем чаши – 2л, мощность двигателя 500 Вт. Пена была приготовлена с помощью последовательного добавления компонентов в измельчитель и дальнейшего смешивания на протяжении 60 секунд. Кратность пены была определена как отношение объема полученной пены к начальному объему раствора. Устойчивость пены во времени определялась на основании объема выделившейся жидкости после выдержки определенного её количества на протяжении 30 минут. Характеристики технической пены определялись на основании рекомендаций по расчету и производству изделий из поризованного арболита разработанных НИИЖБ Госстроя СССР.

Тепловлажностная обработка бетона (ТВО) проводилась в условиях нормального атмосферного давления в камере непрерывного действия при значениях температуры изотермического прогрева 80°C и 90°C а также времени изотермической выдержки: 6, 8, 10, 12 часов. Скорость подъема и снижения температуры в камере находилась на уровне 40–45 °C/час.

2.2.3. Механические методы испытания композиционного материала

Испытания на прочность при изгибе и сжатии балочек проводились на прессе «FORM+TEST prüfsystemePOB1154 D-88491» в возрасте 28 суток на основании требований ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия» и ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Прочность образцов кубов с размерами 10x10x10см была определена на испытательном прессе «С» модификации 50-С8455, с максимальной нагрузкой 2000кН.

Определение морозостойкости, призмочной прочности и модуля упругости шлакосиликатного поризованного арболита производились согласно ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

Выводы по Главе 2

1. В рамках диссертационной работы, для проведения исследований по получению композиционных шлакосиликатных поризованных арболитовых материалов, были применены следующие материалы: молотый доменный гранулированный шлак, натриевое жидкое стекло, щепа хвойных пород древесины, концентрированные растворы пенообразователей, бентонитовая глина и пр.

2. Исследования исходных компонентов композиционных шлакосиликатных арболитов были проведены с использованием различных методов анализа, включающих: РФА, РЭМ, химический, гранулометрический пр.

3. В результате проведенных исследований были установлены базовые физико-механические свойства исходных материалов, а именно древесной щепы хвойных пород, доменного гранулированного шлака и бентонитовой глины. В частности, проведенные исследования порошка доменного гранулированного шлака показали, что материал, в основном, состоит из стекловидной фазы, содержание которой, достигает значения 85%. В то же время кристаллическая фаза шлака представлена минералом Акерманитом.

4. Исследование структуры и свойств полученных композиционных материалов, а также обработка результатов проводилась с использованием методик, описанных в нормативно технической документации, действующей в Российской Федерации. Для исследования свойств полученного материала применялись методы: РФА, РЭМ, ИК, ДТА и другие виды анализов.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПОРИЗОВАННЫХ ШЛАКОСИЛИКАТНЫХ АРБОЛИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наиболее перспективными и наиболее часто применяемыми стеновыми материалами при строительстве жилых и общественных зданий являются неавтоклавный пено-и газобетон марок по средней плотности D600-D700. Перспективным материалом из класса легких бетонов известным на сегодняшний день является арболит, а в частности поризованный арболит на основе деревоцементного композита [31,47,143].

Неавтоклавный пенобетон из-за более простой технологии приготовления является эффективным строительным материалом, так как при его изготовлении исключается операция по удалению горбушки, получается материал с более стабильной ячеистой структуры, получаемой за счет введения технической пены, кроме того, поризация арболитовой смеси приводит к значительному улучшению его физико-механических свойств, а также снижению показателей теплопроводности [144,145].

3.1. Получение технической пены с оптимальными параметрами качества, а также оптимизация её состава

Получение технической пены с оптимальными параметрами качества является важной задачей, поскольку характеристики пены напрямую влияют на свойства получаемого композита [146]. Параметры ячеистой структуры композита прямо пропорционально зависят от вида пенообразователя и от качества получаемой на основе него пены, которая характеризуется дисперсностью, кратностью и устойчивостью во времени.

В экспериментах по получению пены были использованы два вида пенообразователя. Первый пенообразователь белкового типа, который при взаимодействии с арболитовой смесью, содержащей доменный гранулированный шлак, натриевое жидкое стекло и древесную щепу, активно гасился, что означает активное уменьшение объема пены и выделение

содержащийся в ней воды. Получаемая смесь далее непригодна для производства арболитовых композитов.

Проведенные эксперименты с натриевым жидким стеклом и технической пеной, изготовленной на основе раствора, содержащего протеиновый пенообразователь и воду показали, что при добавлении метасиликата натрия к приготовленной технической пене, происходит интенсивное разрушение последнего. Данное явление, возможно, вызвано резкощелочной средой жидкого стекла, а также несовместимостью молекулярной структуры составляющих обоих компонентов. Однако данный факт требует более детального рассмотрения.

Проведенные эксперименты с технической пеной на основе синтетического пенообразователя показали совместимость данного вида веществ со смесью, содержащей метасиликат натрия, доменный гранулированный шлак и древесную щепу.

Результаты по определению технических характеристик пены, а именно кратности и устойчивости во времени показали, что для получения пены пригодной для использования в шлакосиликатном поризованном арболите необходимо улучшение её технических характеристик, в частности устойчивости.

Получение устойчивых пен зависит от многих факторов среди них: количество и вид ПАВ, способ получения пен, содержание добавок и пр. Для получения стабильной ячеистой структуры необходимо изготовить пену с достаточной кратностью и устойчивостью.

Важным фактором получения устойчивых пен является концентрация раствора пенообразователя, которая прямо пропорциональна содержанию ПАВ в растворе. Хорошо известна способность поверхностно активных веществ замедлять процессы гидратации вяжущих систем. Поэтому поиск необходимой и достаточной концентрации раствора пенообразователя является необходимым условием получения высококачественного композита.

Одним из важнейших показателей, влияющих на качество получаемого пенобетона, также является содержание пенообразователя в составе композита. Так при недостатке пенообразователя может быть получен композит с низкими строительно-техническими и физико-механическими свойствами. Напротив же избыток пенообразующего компонента может привести к замедлению процессов гидратации системы и в последствии сказаться на физико-механических характеристиках ячеистого бетона [126,140,147].

Установленное производителем оптимальное значение концентрации пенообразующего раствора при условии использования пеногенератора находится в пределах 3,0%. Однако при использовании других способов получения пены, к примеру с помощью механических взбивателей пены таких как лабораторный измельчитель, высокоскоростной пенобетоносмеситель и пр., концентрация должна подбираться отдельно.

Для установления оптимальной концентрации раствора пенообразователя, в настоящей работе, пользовались методиками описанными в рекомендациях по расчету и производству изделий из поризованного арболита разработанных НИИЖБ Госстроя СССР. Согласно данной методике, техническая пена была приготовлена с помощью последовательного добавления компонентов в измельчитель и дальнейшего смешивания на протяжении 60 секунд. Кратность пены была определена как отношение объема полученной пены к начальному объему раствора. Устойчивость пены во времени определялась на основании объема выделившейся жидкости после выдержки определенного её количества на протяжении 30 минут.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что необходимая концентрация раствора пенообразователя для получения оптимальных значений кратности в пределах 12,5 и плотности (в пределах 70–80 г/л) находится на уровне 3,3%. Дальнейшее увеличение концентрации

свыше данного значения (до 4%) нецелесообразно поскольку, ведет к незначительному улучшению свойств пены: кратности и устойчивости. Помимо этого, высокая концентрации раствора пенообразователя, в свою очередь, может негативно повлиять на процессы структурообразования твердеющего шлакосиликатного арболита и в последствии на его физико-механические характеристики.

Очевидно, что дальнейшее качественное улучшение свойств получаемой технической пены, без увеличения расхода ПАВ и соответственно концентрации пенообразующего раствора, возможно только за счет введения добавок модификаторов.

Для повышения технических характеристик пены использовались три добавки модификатора технической пены: жидкое стекло, бентонитовая глина и гумат натрия. В таблице 3.1 представлены результаты определения свойств полученных составов технической пены с различным содержанием добавок.

Таблица 3.1 – Свойства различных составов технической пены

№ состава	Концентрация раствора пенообразователя, %	Наименование добавки стабилизатора			Время взбивания, сек	Характеристики пены	
		Кол-во жидкого стекла от массы раствора, %	Кол-во бентонитовой глины от массы раствора, %	Кол-во гумата натрия от массы раствора, %		Кратность пены	Кол-во выделившийся жидкости за 30мин, %
1	3,3	-	-	-	60	12,5	87,33
2	3,3	1,0	-	-		12,5	70,63
3	3,3	1,5	-	-		12,5	67,25
4	3,3	2,0	-	-		12,6	72,17
5	3,3	2,5	-	-		12,4	73,10

Продолжение таблицы 3.1

6	3,3	3,0	-	-	12,5	72,50
7	3,3	-	1,00	-	12,7	62,2
8	3,3	-	1,50	-	12,4	57,1
9	3,3	-	2,00	-	12,5	54,2
10	3,3	-	2,50	-	12,3	41,86
11	3,3	-	3,00	-	12,5	35,7
12	3,3	-	3,50	-	12,5	32,1
13	3,3	-	4,00	-	12,4	28,2
14	3,3	-	4,50	-	10,5	21,2
15	3,3	-	5,00	-	7,5	15,1
16	3,3	-	-	1,00	12,5	81,56
17	3,3	-	-	1,50	12,3	80,48
18	3,3	-	-	2,00	12,2	79,1
19	3,3	-	-	2,50	12,5	80,2
20	3,3	-	-	3,00	12,5	81,5

Полученные результаты показывают, что лучшими свойствами, а именно, кратностью и устойчивостью пены обладают образцы с добавкой бентонитовой глины. Состав, содержащий данную добавку в количестве равном 4% масс., не влияет на кратность получаемой пены и в то же время, в значительно снижает водоотделение до значения в 28,2%. Положительное влияние добавки объясняется тем, что тонкодисперсные частицы минерального порошка препятствуют вытеканию жидкости из пленки на границу Плато. Также за счет быстрого схватывания переводят пленку в псевдотвердое состояние.

Увеличение содержания добавки минерального порошка выше значения в 4% приводит к уменьшению кратности технической пены. Подобное явление может происходить из-за процессов хемосорбции протекающей между активными радикалами поверхностно активного вещества и поверхностью минеральной частицы. В результате данного процесса изменяется значение поверхностного натяжения на границе раздела газ-жидкость, что приводит к процессу коалесценции воздушных пузырьков. Зависимость кратности пены от процентного содержания добавки стабилизатора показана на рисунке 3.1.

Сущность стабилизирующего эффекта добавок метасиликата натрия, а также гумата натрия, содержащего в своём составе соли гуминовых кислот заключается в создании в системе с раствором пенообразователя положительно и отрицательно заряженных микрочастиц и аквакомплексов адсорбирующихся на поверхности тонких пленок пенных пузырьков и электростатически взаимодействующих между собой и полярной группой поверхностно активного вещества структурируя пену.

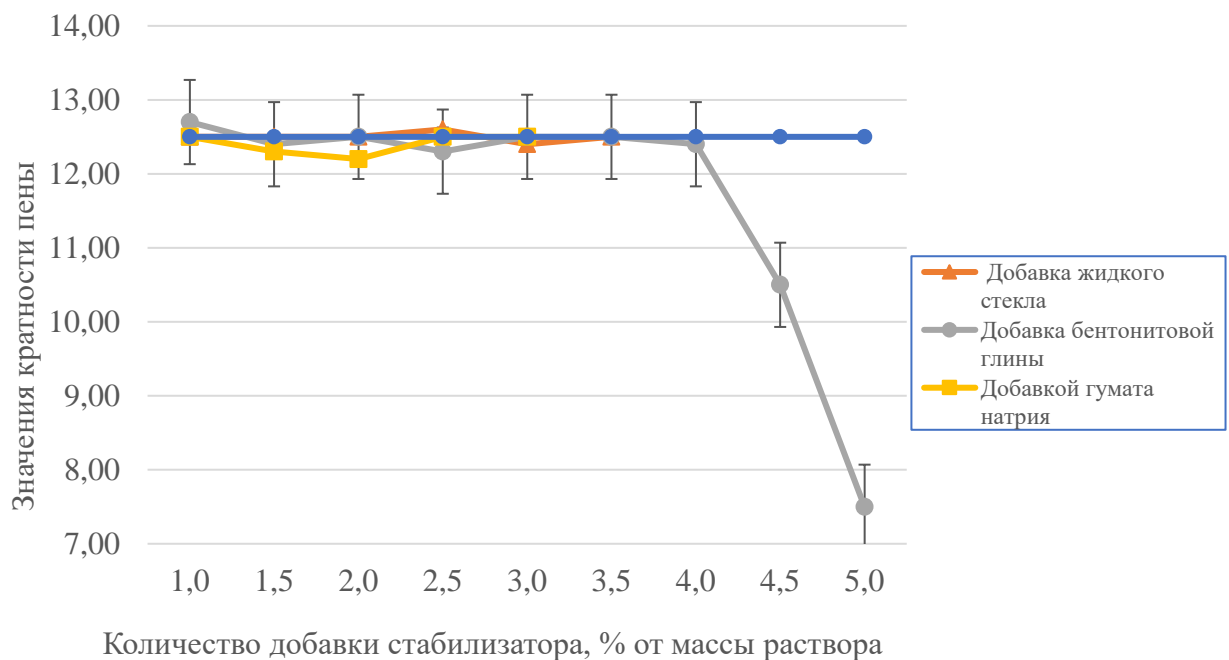


Рисунок 3.1 – зависимость кратности пены от процентного содержания добавки стабилизатора

Зависимость выделения воды из пены от процентного содержания добавки стабилизатора показана на рисунке 3.2.

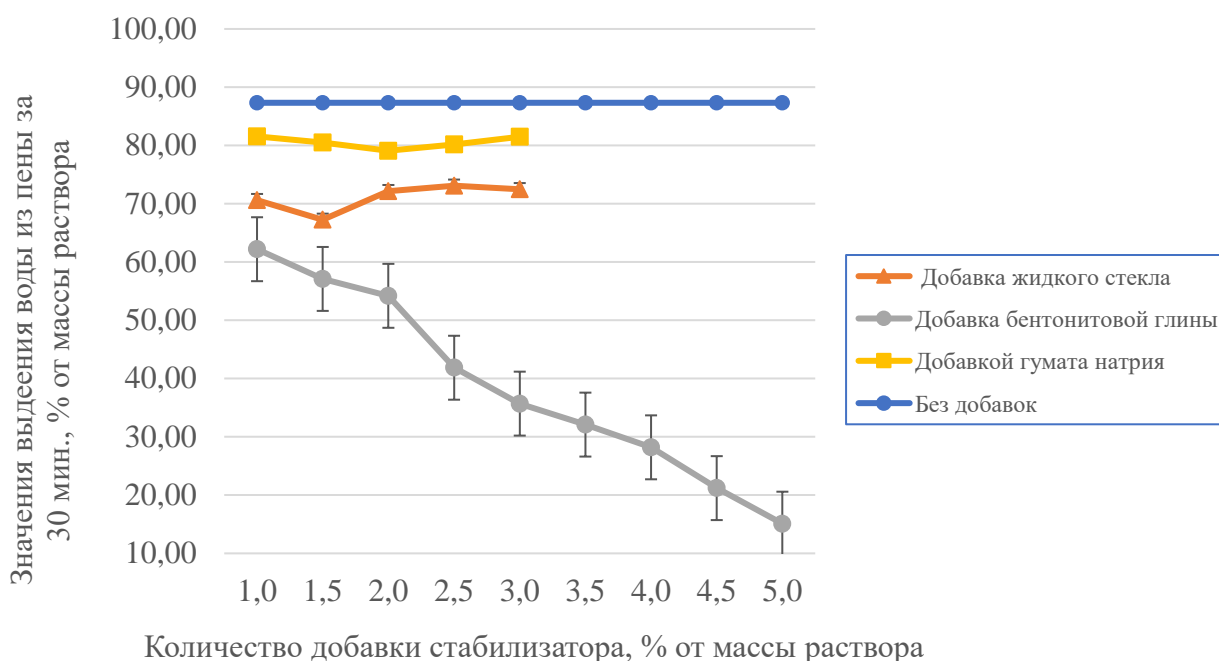


Рисунок 3.2 – Зависимость выделения воды из пены от процентного содержания добавки стабилизатора

Слабый стабилизирующий эффект данных добавок в рассматриваемых составах технической пены, возможно, связан с природой взаимодействия молекул добавок стабилизаторов и поверхностно-активного вещества, представляющего собой водный раствор анионных ПАВ с функциональными добавками.

Таким образом, установлено, что пена, полученная на основе пептидных пенообразователей, в резкощелочной среде, создаваемой в системе шлак-жидкое стекло разрушается, делая невозможным ее эффективное применение, т.е. пены, полученные на основе белковых пенообразователей в разрабатываемых системах, применяться не могут.

Показано, что синтетический пенообразователь может эффективно применяться с добавкой стабилизатором в виде тонкодисперсного порошка бентонитовой глины для производства технической пены высокого качества,

которая может быть использована для производства высокоэффективных шлакосиликатных поризованных арболитовых материалов.

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

3.2. Кинетика процессов формирования структуры композиционного поризованного арболита

Кинетика процессов формирования структуры композиционного поризованного арболита может оказывать существенное влияние на технологический процесс его получения. Поэтому были проведены исследования по установлению кинетических зависимостей формирования его структуры от вида используемого связующего и пенообразователя. В качестве связующего в изучаемых составах арболитов использовали шлакосиликатное вяжущее, изготовленное на основе натриевого жидкого стекла и доменного гранулированного шлака. У изготовленного связующего были определены сроки схватывания, нормальная густота и марка шлакосиликатного вяжущего по прочности. Полученные характеристики вяжущей системы, содержащей алюмосиликатный компонент в виде доменного гранулированного шлака и натриевого жидкого стекла в качестве затворителя представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики шлакосиликатного вяжущего

Сроки схватывания шлакосиликатного вяжущего		Нормальная густота, %	Марка вяжущего
Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин		
30	50	46,2	M300

Сравнительно короткие сроки схватывания шлакосиликатного вяжущего изготовленного на основе метасиликата натрия, а также высокий темп набора прочности вяжущего на основе натриевого жидкого стекла по сравнению с другими вяжущими на основе не силикатных щелочных компонентов можно объяснить введением в состав коллоидного оксида кремния, который вызывает более интенсивные катионообменные процессы в начальный период твердения и как следствие образование практически нерастворимых низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция.

Помимо этого, высокая дисперсность доменного гранулированного шлака способствуют увеличению водопотребности вяжущего на его основе и в следствие получению высокого показателя нормальной густоты шлакосиликатного вяжущего.

Согласно ранее проведенным исследованиям [34,140,147,148] концентрированные растворы ПАВ могут негативно сказываться на гидратации твердеющего шлакосиликатного композита. Поэтому для оценки влияния технической пены, изготовленной на основе синтетического пенообразователя на процессы гидратации, происходящие в твердеющем шлакосиликатном поризованном арболите были проведены исследования по определению тепловыделения методом изотермической калориметрии. Измерения проводили на приборе TAM Air 3116–2, TA Instruments.

Для исследования кинетики гидратации шлакосиликатного вяжущего с применением натриевого жидкого стекла в качестве затворителя, были изготовлены два образца: контрольный (без присутствия раствора пенообразователя) и исследуемый (с добавлением раствора пенообразователя концентрацией 3,3% в количестве 0,35% от массы вяжущего).

В результате проведенных исследований были построены кривые тепловыделений за разные промежутки времени. Кривые тепловыделения

контрольного образца и образца с добавлением технической пены представлены на рисунке 3.3, 3.4, 3.5 и 3.6.

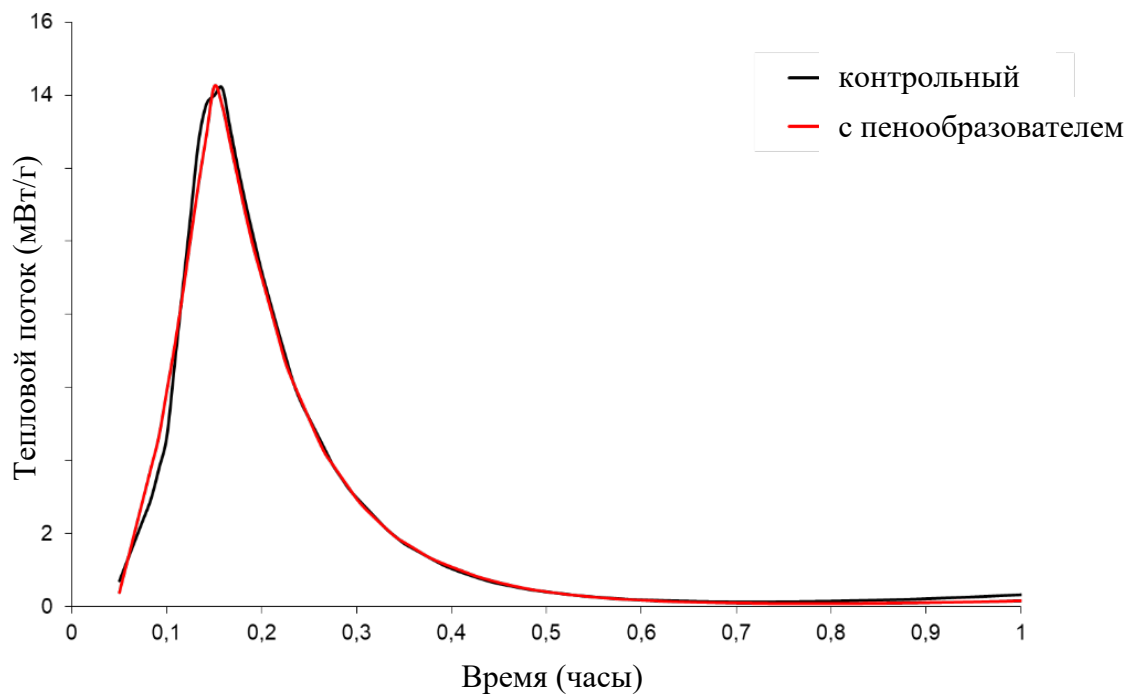


Рисунок 3.3 – Зарегистрированные тепловые потоки для исследуемых образцов в интервале 0 – 1 ч. (в диапазоне 0 – 16 мВт/г)

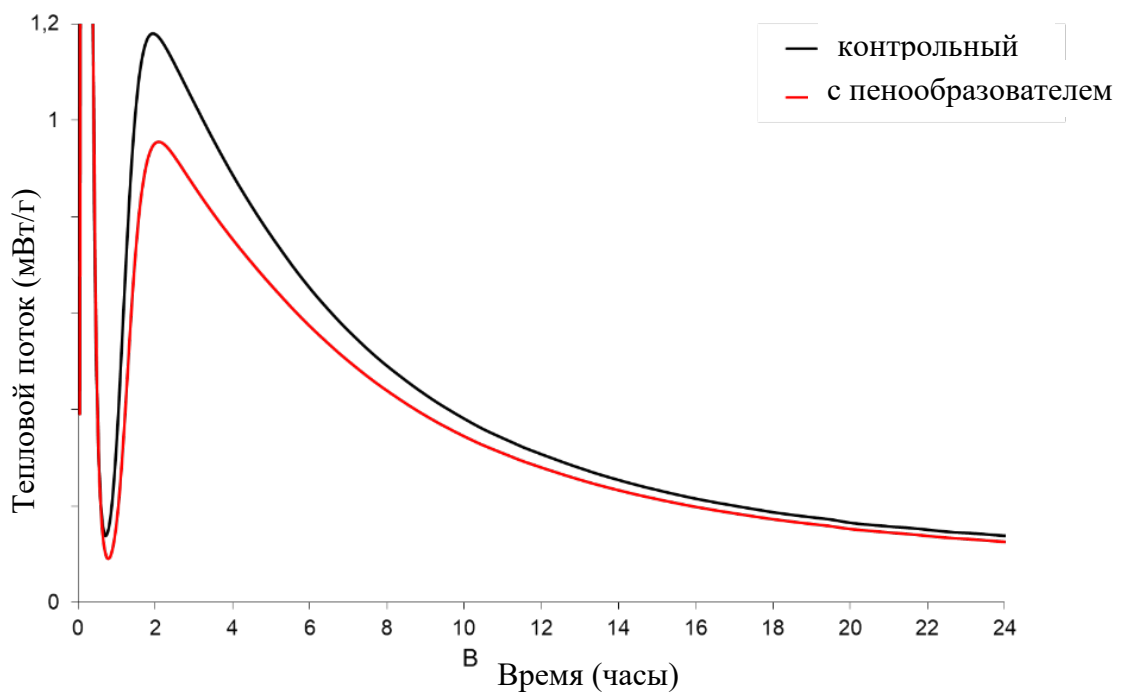


Рисунок 3.4 – Зарегистрированные тепловые потоки для исследуемых образцов в интервале 0 – 24 ч. (в диапазоне 0 – 1,2 мВт/г)

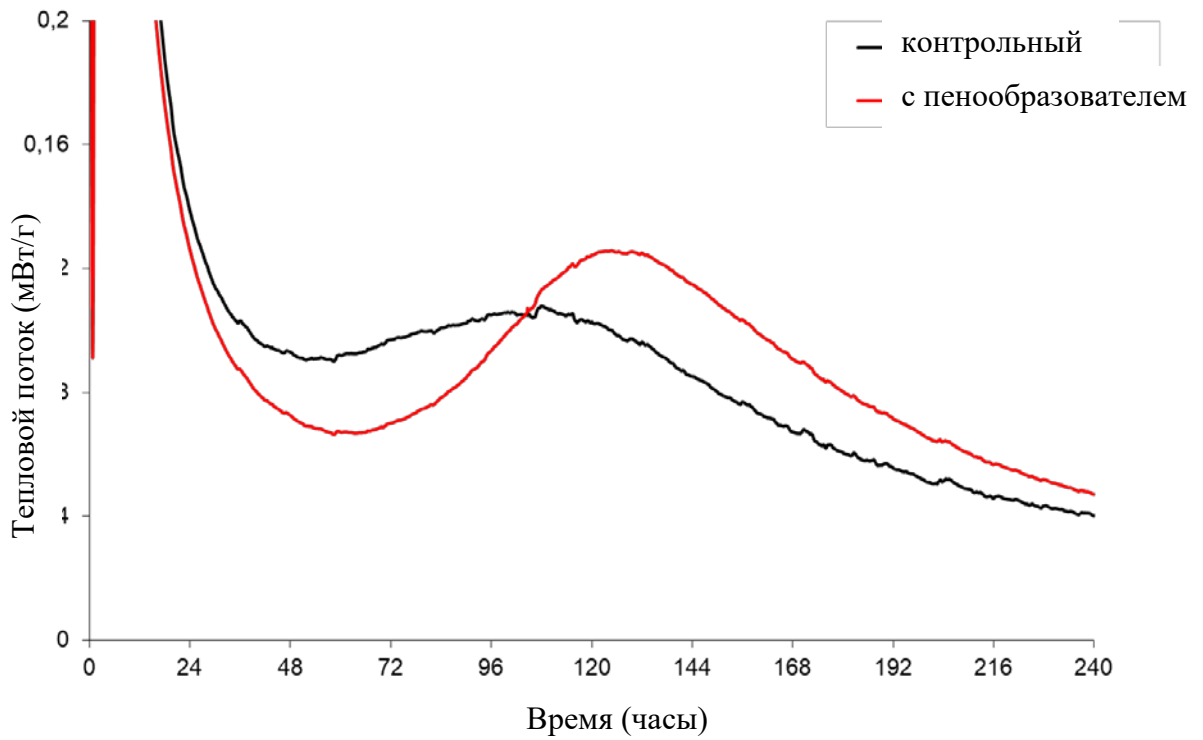


Рисунок 3.5 – Зарегистрированные тепловые потоки для исследуемых образцов в интервале 0 – 240 ч. (в диапазоне 0 – 0,2 мВт/г)

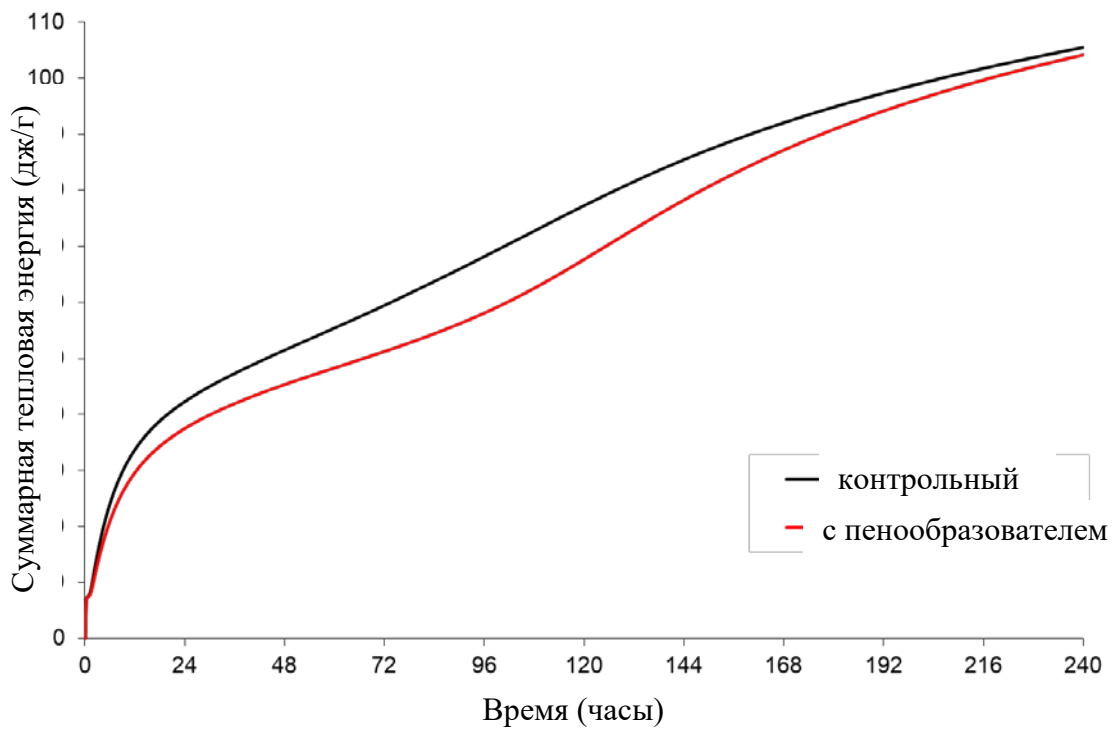


Рисунок 3.6 – Интегральные графики полного тепловыделения для исследуемых образцов

Измеренные значения тепловыделения для контрольного образца и для образца с пенообразователем (на грамм смеси) представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения тепловыделения образцов

Время t, час.	Мощность теплового потока W_t , Вт/г		Суммарная тепловая энергия Q_t , Дж/г	
	Контрольный образец	Образец с пенообразовател ем	Контрольный образец	Образец с пенообразовател ем
1	0,3327	0,167123781	7,7704	7,618482622
2	1,1780	0,952329252	11,0901	9,993978226
4	0,8874	0,753475126	18,5598	16,21118842
8	0,4908	0,439366365	28,1333	24,5804393
12	0,3075	0,280015589	33,7095	29,61657973
24	0,1385	0,126036796	42,3029	37,50324934
72	0,0970	0,070100132	59,4760	51,23573038
96	0,1050	0,093463906	68,1828	58,09636849
120	0,1026	0,124313143	77,2728	67,66824337
144	0,0852	0,114889711	85,4628	78,26760791
168	0,0673	0,090786935	92,0525	87,16628375
192	0,0556	0,071516373	97,3501	94,15034219
216	0,0459	0,056757352	101,7440	99,67621657
240	0,0401	0,047118995	105,4823	104,1579945

По результатам проведенных исследований можно заключить, что для обоих исследуемых 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.

После завершения индукционного периода на экзотермических кривых наблюдаются два пика тепловыделения (рисунок 3.5) через 2 часа и 110 часов

(для контрольного образца) и через 2 часа и 128 часов (для образца с пенообразователем) после начала реакции. Второй пик для контрольного образца более протяжен во времени и менее интенсивный чем у образца с пенообразователем, причем для него второй пик более выражен и имеет более высокую интенсивность. Позднее наступление реакции на 18 часов с интенсивным выделением тепла у образца с пенообразователем обусловлено блокирующим действием ПАВ из пенообразователя части связующего из-за своей высокой адсорбционной способности молекул, что не только замедляет процессы структурообразования, но и может влиять на морфологию новообразований композита. При разрыве оболочки из ПАВ у частиц выделяется тепловая энергия, которая аккумулировалась внутри зерна, что и показывает интенсивность пика.

Суммарная тепловая энергия, выделившаяся в процессе реакции в интервале времени от 3 минут до 240 часов от момента смешения компонентов составляет 105,48 Дж/г (для контрольного образца) и 104,16 Дж/г (для образца с пенообразователем). Как видно из представленных данных, суммарная тепловая энергия в образцах различается всего на 1,25%, что не превышает ошибку измерения. Тем самым можно заключить, что в поризованных образцах протекают те же процессы, что и в контрольных образцах, но несколько запаздывают, что необходимо учитывать в производстве технологического процесса получения поризованных арболитов.

После 240 часов реакции тепловыделение незначительно и не превышает 0,04 Вт/г смеси, что может свидетельствовать о продолжении процессов структурообразования.

Таким образом, изучено влияние технической пены, изготовленной на основе синтетического пенообразователя на процессы гидратации, происходящие в твердеющем шлакосиликатном поризованном арболите. Проведенные исследования показывают, что для формирования структуры

композиционного поризованного арболита в качестве связующего может использоваться шлакосиликатное вяжущее, изготовленное на основе натриевого жидкого стекла и тонкомолотого доменного гранулированного шлака, а в качестве технической пены, может применяться синтетический пенообразователь.

3.3. Влияние компонентов арболитовых композиционных материалов на плотность изделий

Методике подбора составов композиционных арболитовых материалов посвящено большое количество исследований [36,37,149].

Состав арболита подбирают расчетно-экспериментальным путем исходя из требуемых физико-механических параметров композита таких как: класс прочности и марка по плотности, а также на основе исходных характеристик используемого сырья: активности вяжущего и природы заполнителя.

Одной из разновидностей арболита является его поризованный аналог. Технология поризации композита заключается во введении технической пены или специальных порообразующих добавок (алюминиевой пудры или пасты, воздухововлекающих добавок) в состав арболитовой смеси на стадии приготовления. В результате получается поризованный арболитовый композит с высокими физико-механическими и строительно-техническими свойствами.

Как уже было отмечено в первой главе данной работы, наиболее эффективный способ поризации арболита считается способ порообразования за счет технической пены. Такой способ даёт более устойчивую и равномерную структуру по сравнению с остальными.

Однако вопрос подбора составов композиционных поризованных шлакосиликатных арболитов, до настоящего момента, с применением системных методов анализа не изучался. Поэтому для решения задачи

подбора оптимального состава композита было принято решения воспользоваться расчётно-экспериментальным методом.

Для получения представления о механизме взаимодействия компонентов шлакосиликатного арболита, а также оценить физико-механические свойства композита полученного из материалов с оптимальными параметрами качества. На первом этапе работы были проведены опыты по получению шлакосиликатного арболита без применения технической пены.

Для расчета состава арболита за исходные характеристики были приняты марка арболита по плотности D600 и класс прочности B1.5 – B2.

Расчет расхода компонентов смеси, а именно доменного гранулированного шлака производился исходя из данных источников [36,37,150], в то время как расход древесной щепы производится по формуле (3.1).

$$\rho_0 = 1,2Ш + Щ \quad (3.1)$$

Где ρ_0 – плотность арболита в сухом состоянии; Ш – расход доменного гранулированного шлака; Щ – расход древесной щепы; 1,2 – коэффициент учитывающий прогидратированное с вяжущим жидкое стекло.

Требуемое исходное количество метасиликата натрия, устанавливалось экспериментальным путем, а именно путём добавления такого количества затворителя в виде жидкого стекла, которое обеспечивает комкование арболитовой смеси при сжатии её рукой без отделения жидкости, так называемого «цементного молока» [36].

Результаты подбора состава шлакосиликатного арболита представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Составы шлакосиликатного арболита

Наименование замеса	Расход шлака, кг/м ³	Расход щепы, кг/м ³	Расход жидкого стекла, кг/м ³	Затворитель/Шлак
S1	360	168	210	0,58
S2	360	168	231	0,64
S3	360	168	189	0,52

3.3.1. Разработка и оптимизация состава поризованного арболитового материала математическим методом двухфакторного композиционного эксперимента

Разработка оптимального состава поризованного шлакосиликатного арболитового материала осуществлялась расчётно-экспериментальным путем, а также с помощью математических методов двухфакторного композиционного эксперимента.

Исходный состав арболита рассчитывался для получения композита с маркой по плотности D600 и классом по прочности B1.5 – B2. Для назначения исходного расхода компонентов пользовались данными и рекомендациями, изложенными в работах [36,37], формулой (3.1). Расход затворителя принимался оптимальным, при условии обеспечения укладки смеси в формы при принятом способе формирования изделий, а также исключая разрушение технической пены. Расход вяжущего компонента был принят по таблицам рекомендаций [36,37,150] учитывая активность вяжущего. Расход технической пены принимался из расчёта полного заполнения межзерновых пустот поризованным шлакосиликатным тестом.

Оптимизация состава с помощью математических методов планирования эксперимента была проведена для оценки влияния составляющих шлакосиликатного поризованного арболита: доменного гранулированного шлака и древесной щепы хвойных пород на физико-механические свойства композита.

В качестве рецептурных факторов были установлены расход доменного гранулированного шлака (X_1) и древесной щепы хвойных пород (X_2). В таблице 3.5, показаны уровни и шаг варьирования факторов. В качестве выходных параметров, параметров отклика выбраны: средняя плотность ρ_0 кг/м³ и прочность при сжатии арболита $R_{сж}$ в МПа.

Таблица 3.5 – Уровни и шаг варьирования факторов

№	Обозначение фактора	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
1	X_1	347	385.5	424	38,5
2	X_2	124	138	152	14

На основании параметров, приведенных в таблице 3.6, составлен план двухфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования. Были проведены 9 опытов с тремя параллельными экспериментами. План и результаты полно факторного эксперимента представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – План и результаты полно факторного эксперимента

№ состава	Кодовая матрица		Выходные данные (отклики)	
	X_1	X_2	R ср., 28 сут., (Мпа)	ρ (Средняя плотность, кг/м ³)
S1	-1	-1	1,38	619
S2	1	-1	2,78	730
S3	-1	1	2,38	644
S4	1	1	3,65	755
S5	-1,4142	0	1,40	623
S6	1,4142	0	3,33	762
S7	0	-1,4142	1,34	677
S8	0	1,4142	1,75	715
S9	0	0	1,50	686

Составы шлакосиликатного арболита разработанные с помощью метода математического планирования эксперимента представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Составы шлакосиликатного арболита

Наименование состава	Шлак, кг/м ³	Щепа, кг/м ³	Р/Ш
S1	347	124	0,7
S2	424	124	0,7
S3	347	152	0,7
S4	424	152	0,7
S5	331,05	138	0,7
S6	439,95	138	0,7
S7	385,5	118,2	0,7
S8	385,5	157,8	0,7
S9	385,5	138	0,7

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 (3.2) выражается полиномом второй степени.

$$Y(X_1, X_2) = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_{11} * X_1^2 + b_{22} * X_2^2 + b_{12} * X_1 * X_2 \quad (3.2)$$

Произведен расчет шести коэффициентов регрессии для каждого из двух полиномов. Оценка значимости коэффициентов регрессии производилась при помощи критерия Стьюдента. В результате статистически незначимые коэффициенты исключались из уравнения регрессии без пересчета значимых коэффициентов. Таким образом уравнения регрессии имеют вид (3.3) и (3.4). Значения вычисленных коэффициентов приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Вычисленные коэффициенты регрессии

№	Выходные данные	Коэффициенты уравнений регрессии					
		b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
1	Y_p	730,19	59,113	19,351	не значим	не значим	3,5
2	Y_R	1.5	0.674	0.306	0.579	не значим	не значим

$$Y_R = 1.5 + 0.674 * X_1 + 0.306 * X_2 + 0.579 * X_1^2 \quad (3.3)$$

$$Y_p = 730,19 + 59,113 * X_1 + 19,351 * X_2 + 3,5 * X_1 * X_2 \quad (3.4)$$

Оценка однородности дисперсий параллельных опытов по определению прочности и плотности проводилась при помощи критерия Кохрена. Расчеты показали, что дисперсии параллельных опытов по определению прочности однородны, поскольку расчетное значение критерия Кохрена находится на уровне 0,311, что меньше табличного значения равного 0,638. В тоже самое время дисперсии параллельных опытов по определению плотности также однородны, поскольку расчетное значение критерия Кохрена меньше, чем его табличное значение ($0,229 < 0,4775$).

Оценка адекватности математической модели была произведена при помощи критерия Фишера. Проверка показала адекватность моделей и уравнений регрессии прочности и плотности, поскольку расчётное значение Фишера моделей меньше его табличного значения.

На основании полученных моделей были построены графики зависимости прочности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода основных компонентов смеси: доменного гранулированного шлака и щепы хвойных пород. На рисунке 3.7 и 3.8 представлены, соответственно, зависимости прочности и плотности от расхода компонентов смеси.

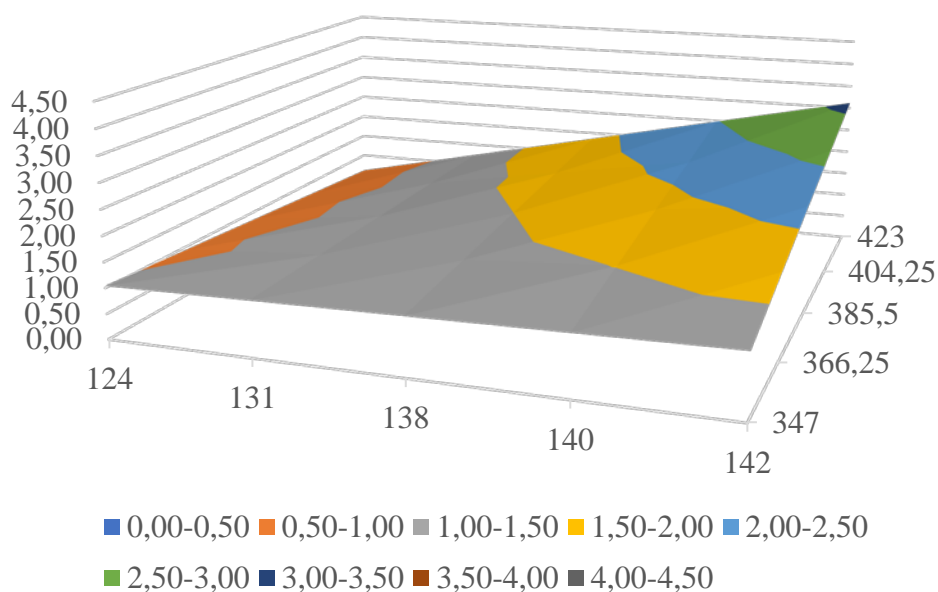


Рисунок 3.7 – Зависимость прочности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода компонентов

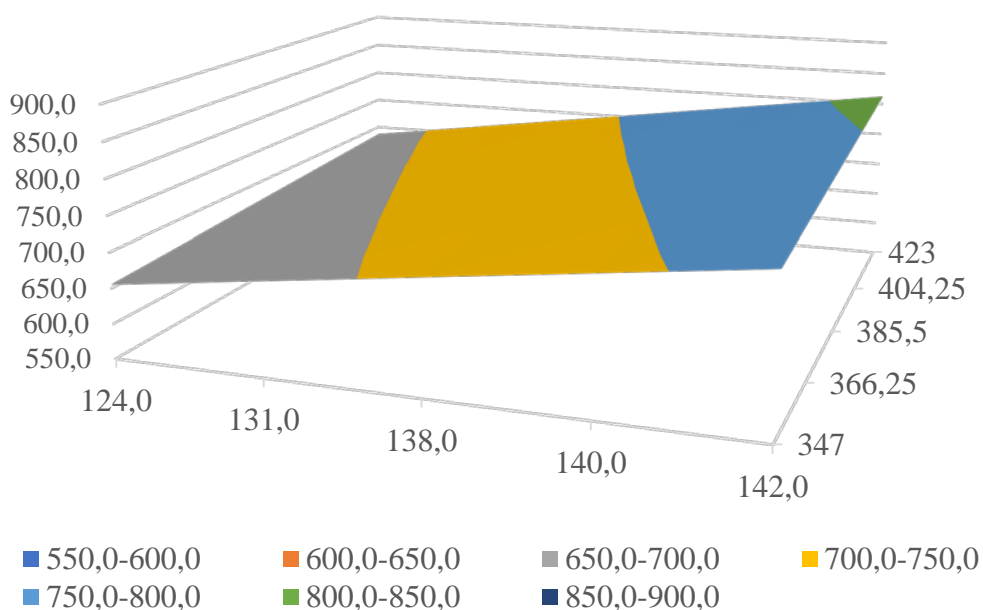


Рисунок 3.8 – Зависимость плотности шлакосиликатного поризованного арболита от расхода компонентов

По результатам анализа уравнений установлено, что на прочность влияет, в основном, количество вяжущего и в меньшей степени кол-во щепы. В то же время на плотность в большей степени влияет кол-во шлака и в меньшей степени кол-во щепы и сочетание этих двух факторов. Физико-

механические свойства полученных в результате экспериментов составов приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Свойства шлакосиликатного арболита

Наименование состава	Плотность в сух. сост., кг/м ³	Плотность в естест. сост., кг/м ³	Рср.,28 сут. (Мпа)
S1	552	619	1,38
S2	640	730	2,78
S3	575	644	2,38
S4	668	755	3,65
S5	546	623	1,40
S6	680	762	3,33
S7	593	677	1,34
S8	627	715	1,75
S9	607	686	1,50

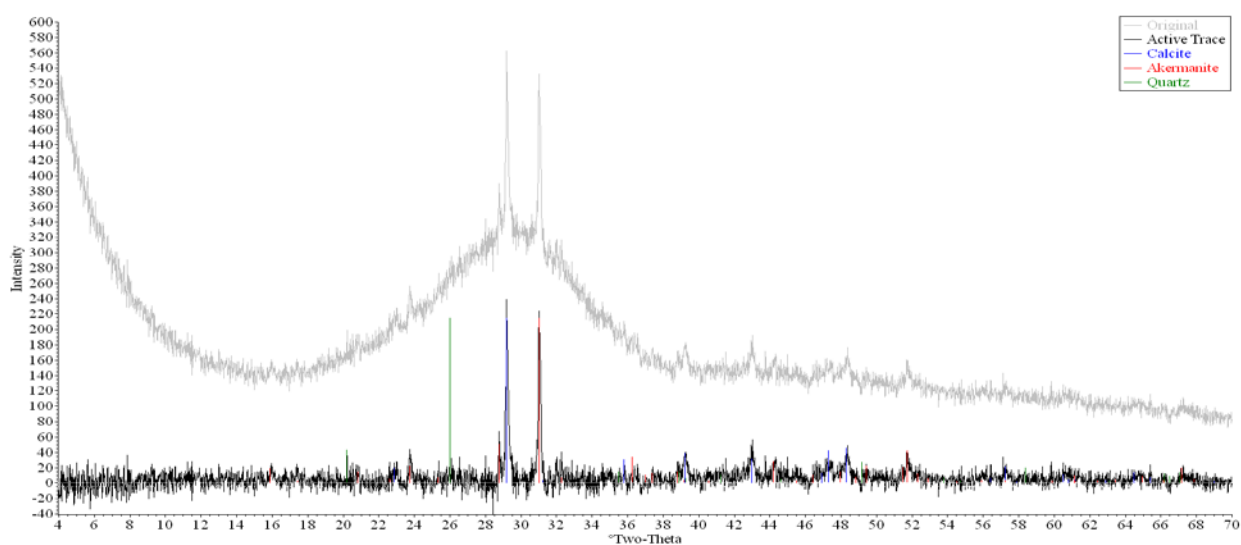
3.4. Изучение структуры арболитовых материалов

Для изучения структуры полученного поризованного шлакосиликатного композита были проведены исследования с использованием рентгенофазового (РФА), электронно-микроскопического (РЭМ) и термогравиметрического анализов (ТГА).

В результате проведенного РФА анализа образцов отличающихся условиями и длительностью твердения были получены рентгенограммы образцов поризованного композита. Для исследований были взяты образцы шлакосиликатного поризованного арболита твердевшие в условиях тепловлажностной обработки (ТВО) при 80 и 90°С в течение 12 и 10 часов соответственно. А также образцы, твердевшие в лабораторных условиях в течение 1 суток и 28 суток.

Рентгенограммы образцов твердевших в условиях ТВО при температуре 80 и 90°С в течение 12 и 10 часов представлены на рисунках 3.8 и 3.9 соответственно. Рентгенограмма образца, твердевшего в естественных

условиях в течение 1-х суток представлены на рисунке 3.10. Рентгенограмма образца, твердевшего в течение 28-ми суток представлен на рисунке 3.11.

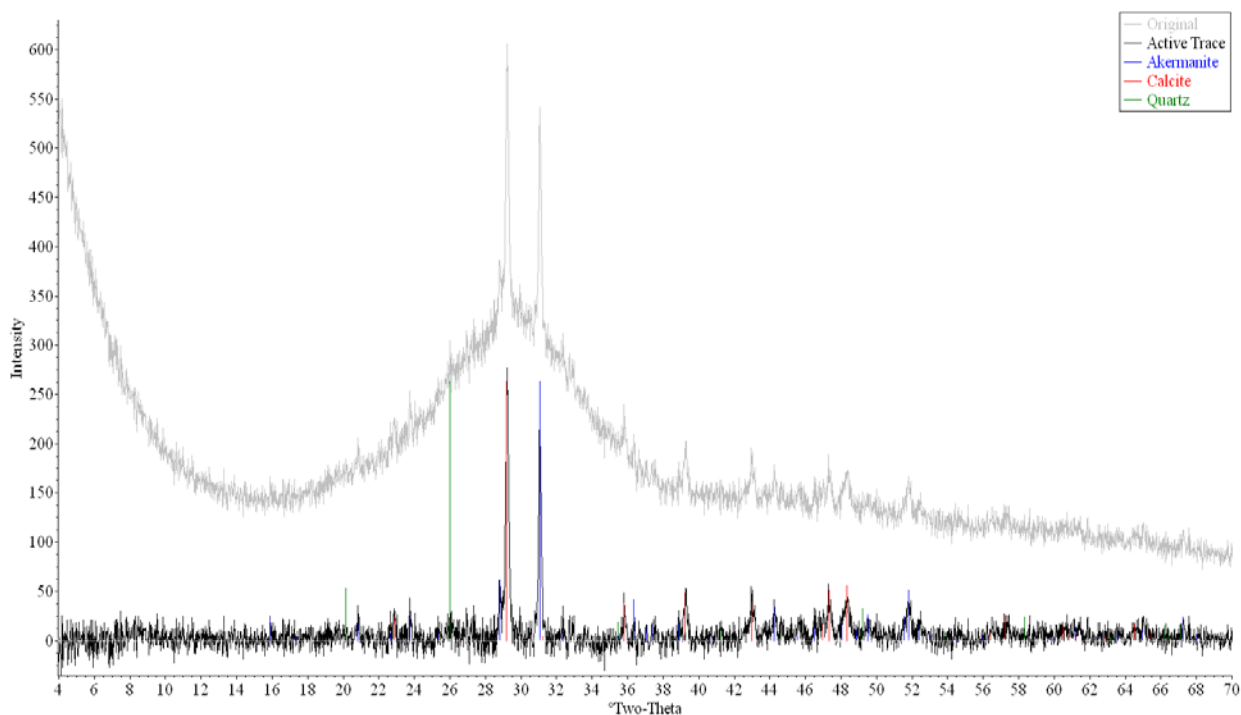


**Рисунок 3.8 – Рентгенограмма образца после ТВО при 80°С
в течение 12 часов**

Минералогический состав образца пропаренного при 80°С в течение 12 часов преимущественно представлен аморфной фазой (92,0 %), а также кристаллическими фазами кальцита CaCO_3 (3,4 %), окерманита $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ (4,4 %) и кварца SiO_2 (0,2 %). Количественное содержание фаз данного образца, полученное с помощью нестандартного рентгенофазового анализа представлено в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Содержание фаз в образце шлакосиликатного поризованного арболита пропаренного при 80°С

Содержание минерала, %			Аморфная фаза
Кальцит	Окерманит	Кварц	
CaCO_3	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	SiO_2	
3,4	4,4	0,2	92,0



**Рисунок 3.9 – Рентгенограмма образца после ТВО при 90°С
в течение 10 часов**

Минералогический состав образца пропаренного при 90°С в течение 12 часов преимущественно представлен аморфной фазой (92,0 %), а также кристаллическими фазами кальцита CaCO_3 (4,0 %), окерманита $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ (3,7 %) и кварца SiO_2 (0,3 %). Количественное содержание фаз данного образца, полученное с помощью нестандартного рентгенофазового анализа представлено в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Содержание фаз в образце шлакосиликатного поризованного арболита пропаренного при 90°С

Содержание минерала, %			Аморфная фаза
Кальцит	Окерманит	Кварц	
CaCO_3	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	SiO_2	
4,0	3,7	0,3	92,0

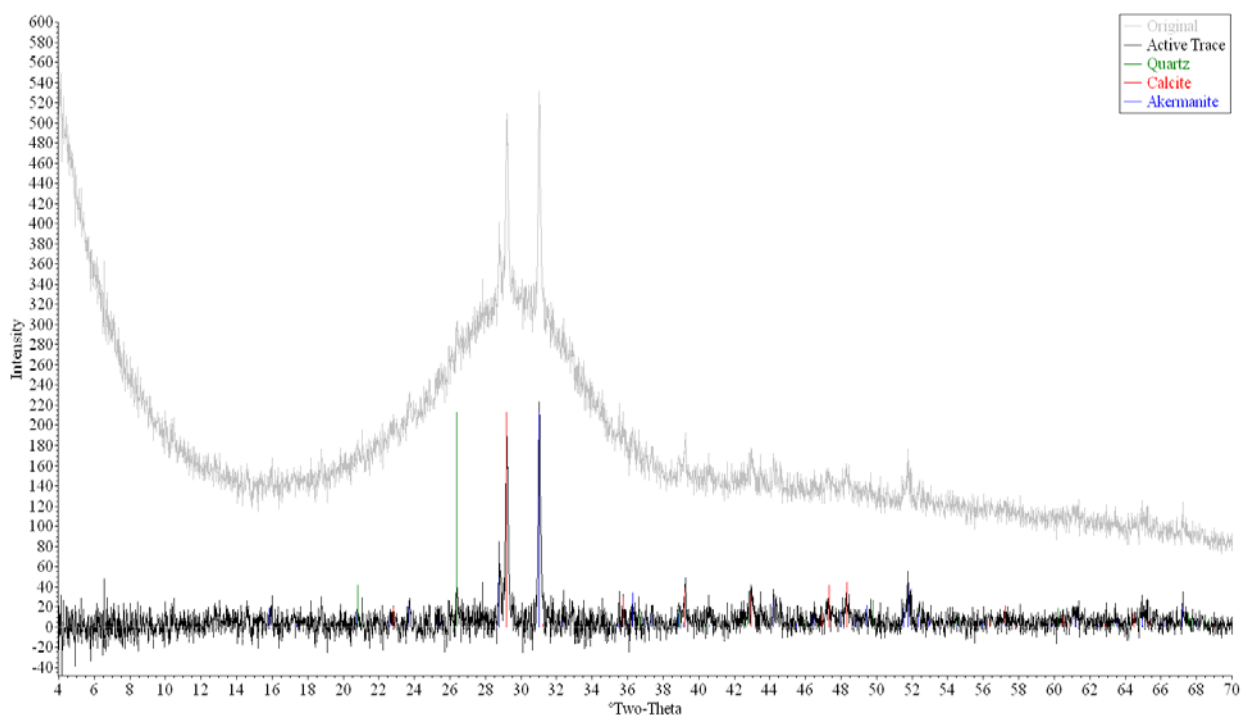


Рисунок 3.10 – Рентгенограмма образца в возрасте 1 сутки

Минералогический состав образца в односуточном возрасте преимущественно представлен аморфной фазой (92,0 %), а также кристаллическими фазами кальцита CaCO_3 (3,1 %), окерманита $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ (4,4 %) и кварца SiO_2 (0,4 %). Количественное содержание фаз данного образца, полученное с помощью бесстандартного рентгенофазового анализа представлено в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Содержание фаз в образце шлакосиликатного поризованного арболита твердевшего 24 часа

Содержание минерала, %			Аморфная фаза
Кальцит	Окерманит	Кварц	
CaCO_3	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	SiO_2	92,0
3,1	4,4	0,4	

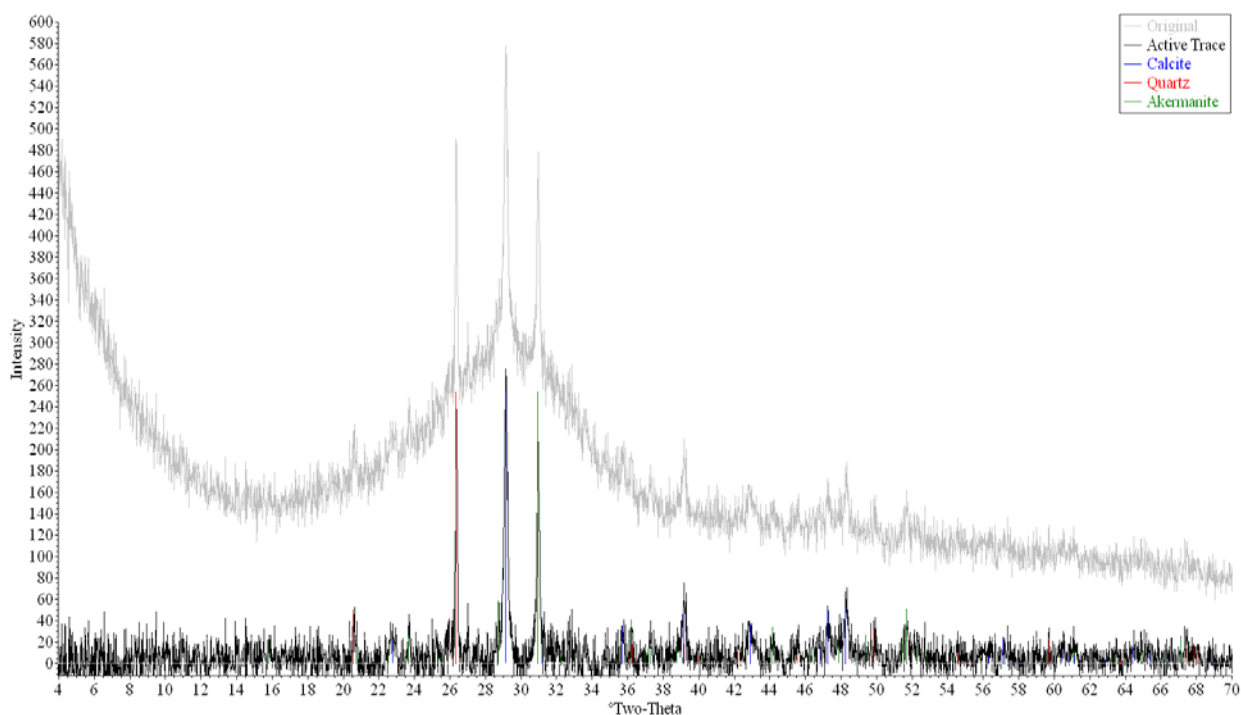


Рисунок 3.11 – Рентгенограмма образца в возрасте 28 суток

Минералогический состав образца, твердевший 28 суток твердения преимущественно представлен аморфной фазой (91,0 %), а также кристаллическими фазами кальцита CaCO_3 (4,6 %), окерманита $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ (2,7 %) и кварца SiO_2 (1,6 %). Количественное содержание фаз данного образца, полученное с помощью бесстандартного рентгенофазового анализа представлено в таблице 3.13.

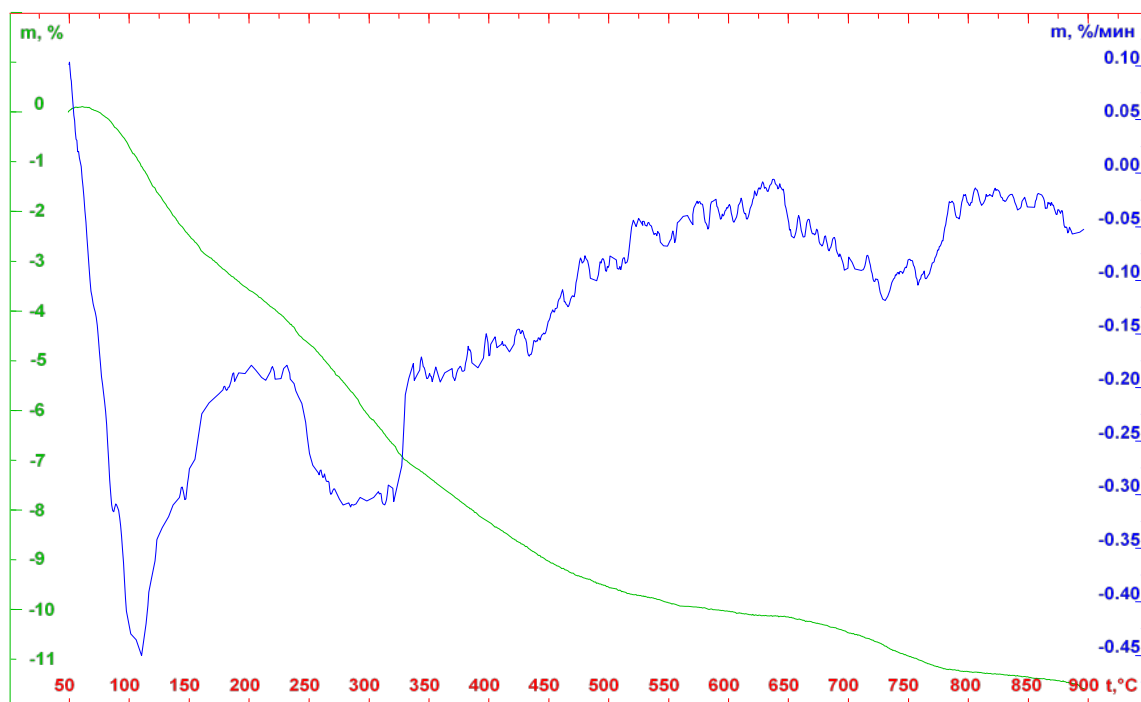
Таблица 3.13 – Содержание фаз в образце шлакосиликатного поризованного арболита твердевшего 28 суток

Содержание минерала, %			Аморфная фаза
Кальцит CaCO_3	Окерманит $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	Кварц SiO_2	
4,6	2,7	1,6	91,0

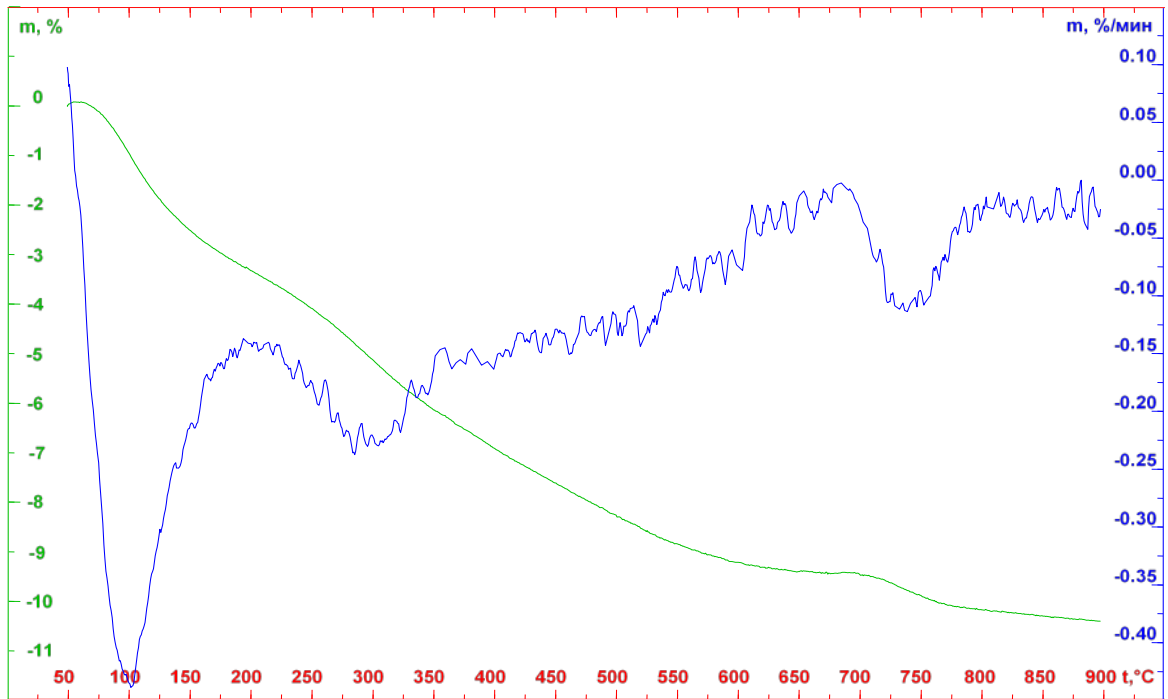
Как показали эксперименты в составе образцов, в основном, присутствует аморфная фаза с небольшим количеством кристаллических новообразований. Возможно, это связано с присутствием в составе образцов нереакционно способных кристаллических новообразований, которые были в составе исходных компонентов, в частности доменного гранулированного шлака.

Для того чтобы оценить природу новообразований присутствующих в составе шлакисиликатного поризованного арболита был проведен ТГА анализ.

ТГА диаграммы образцов твердевших в условиях ТВО при температуре 80 и 90°C в течение 12 и 10 часов представлены на рисунках 3.12 и 3.13 соответственно. Диаграмма образца, твердевшего в естественных условиях в течение 1-х суток представлены на рисунке 3.14. Дериватограмма образца, твердевшего в течение 28-ми суток представлен на рисунке 3.15. В таблице 3.14 приведена температура, при которой происходят потери массы образцом (в %). В таблице 3.15 приведены потери массы образцом (в %) при соответствующих температурах.



**Рисунок 3.12 – Дериватограмма образца после ТВО
при 80°C в течение 12 часов**



**Рисунок 3.13 – Дериватограмма образца после ТВО
при 90С° в течение 10 часов**

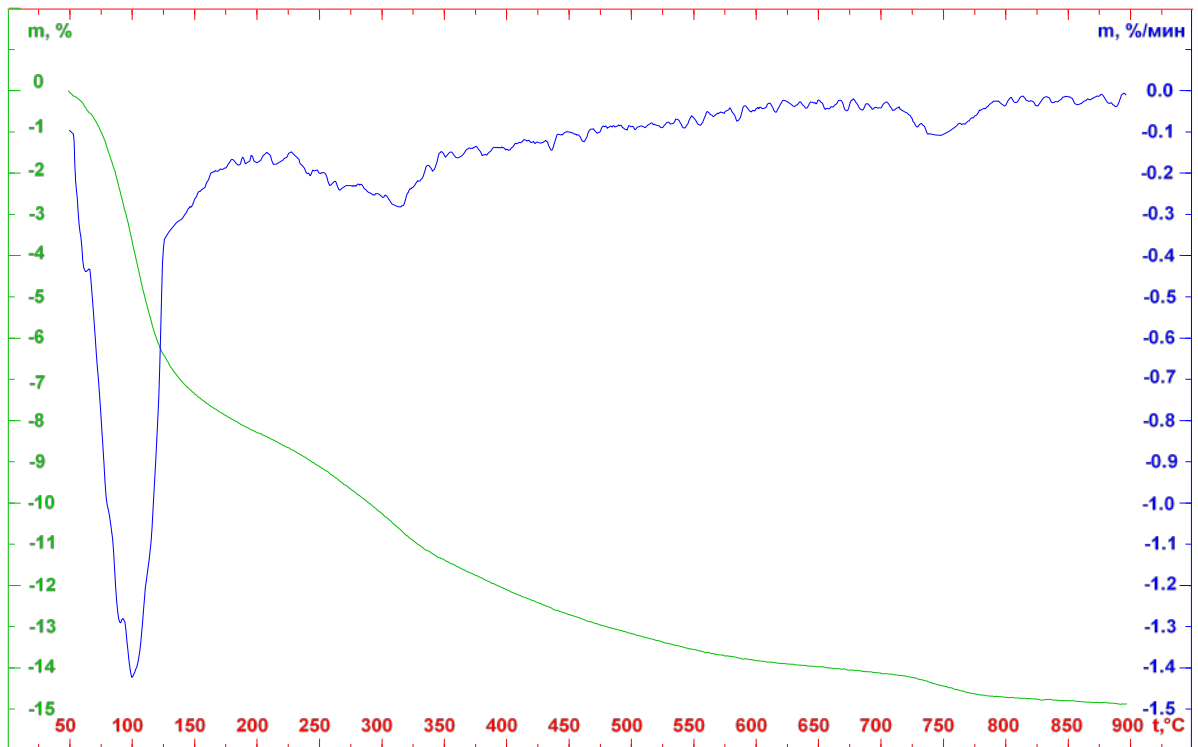


Рисунок 3.14 – Дериватограмма образца после 24 часов твердения

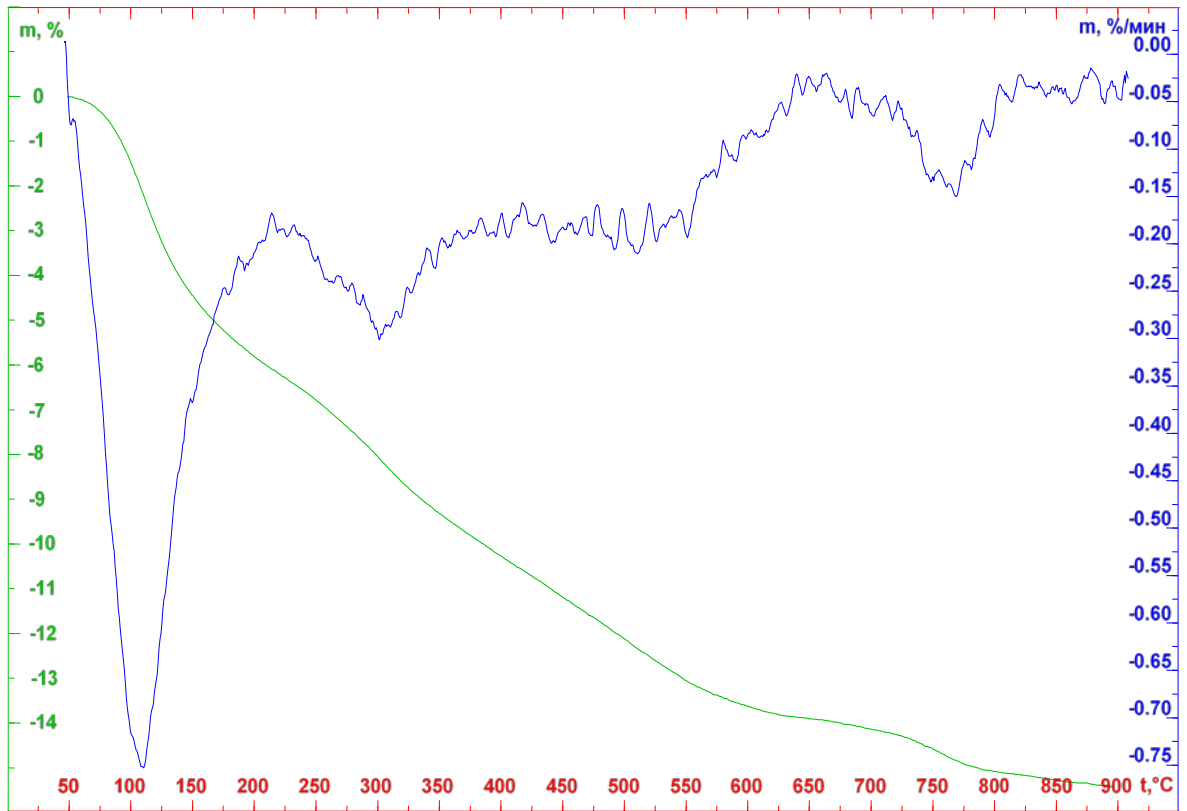


Рисунок 3.15 – Дериватограмма образца после 28-ми суток твердения

Таблица 3.14 – Температура потери массы образцом (в %)

Образец	Температура потери массы, °С														
	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %	14 %	15 %
Суточный	75	86	95	102	110	119	139	183	244	290	330	392	480	656	-
ТВО 90°С 10ч	100	129	178	245	295	342	406	479	568	761	-	-	-	-	-
ТВО 80°С 12ч	107	135	171	223	264	296	331	387	449	588	758	-	-	-	-
28-ми суточный	92	108	121	140	168	210	260	299	356	385	441	493	548	676	784

Таблица 3.15 – Потеря массы образцом при температуре (в %)

Образец	Потери массы при температуре, %																
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
Суточные	3,77	7,36	8,34	9,13	10,26	11,40	12,11	12,71	13,18	13,56	13,83	13,98	14,14	14,45	14,72	14,80	14,88
ТВО 90°С 10ч	1,95	2,56	3,39	4,15	5,19	6,20	6,97	7,67	8,33	8,91	9,27	9,46	9,53	9,95	10,23	10,36	10,46
ТВО 80°С 12ч	0,80	2,54	3,70	4,76	6,19	7,42	8,33	9,10	9,63	9,94	10,11	10,23	10,54	11,00	11,32	11,43	11,67
28-ми суточный	1,50	4,42	5,79	6,77	8,03	9,30	10,25	11,16	12,11	13,005	13,61	13,90	14,12	14,57	15,07	15,26	15,42

В результате проведенного ТГА анализа было установлено, что процесс твердения шлакосиликатного вяжущего может быть исследован с помощью термогравиметрического анализа.

На кривой температурной зависимости массовых потерь для образца твердевшего 24 часа наблюдается ступень убыли массы в области 100-250°C, которая на кривой ДТА соответствует термическим эффектам: ~~отщеплению~~ удалению слабосвязанной сорбционной воды, ступенчатой дегидратации гидросиликата натрия состава $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ при 95 и 170°C, а так же дегидратации образовавшихся аморфных гидросиликатов кальция (например, гиролита $2\text{CaO}\cdot 3\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ГСК первичная структура). Эндотермический эффект при 75°C может соответствовать инконгруэнтному плавлению (плавление с разложением, при котором твёрдая фаза преобразуется в расплав и твёрдую фазу другого состава) гидросиликата натрия.

Вторая ступень убыли массы при 225-350°C на кривой ДТА также сопровождается проявлением эндотермического эффекта, причем для образца в возрасте 28 суток он становится более интенсивным. Вероятно, данный эффект можно отнести дегидратации тоберморита состава $4\text{CaO}\cdot 5\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Эндотермический эффект при 750°C на кривой образца в 28-ми суточном возрасте становится более интенсивным и широким, по сравнению с образцом в возрасте 24 часа и несколько смещается в область более высоких температур. Вероятно, его можно отнести к полной дегидратации тоберморита и гиролита, что логично, на 28 сутки его образовалось больше, эффект выражен ярче.

Дальнейшая убыль массы на кривой ТГ для односуточного образца не отражается на кривой ДТА ярко выраженными эффектами, что может быть связано с проявлением различных по величине и знаку термических эффектов (компенсируют друг друга), сопровождающих полиморфные превращения новообразований различного состава.

При 530-580°C обычно наблюдается эндоэффект разложения гидроксида кальция по реакции $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Портландит, возможно, мог

образоваться в ходе гидратации. Если он и образуется, то сразу связывается двуокисью кремния в гидросиликаты кальция различного состава. Также данный эндоэффект связан с продолжающимся удалением кристаллизационной воды.

Экзотермические эффекты при 650-700°C, подтверждают присутствие CaCO_3 (кальцит), который является результатом карбонизации извести и гидросиликатов кальция.

Образование кальцита, полученного также на рентгенограммах всех образцов, может быть объяснено эффектом катионного обмена происходящего в результате реакции щелочного компонента на основе метасиликата натрия и вяжущего вещества. В результате чего образуется едкая щелочь, а в составе новообразований появляются нерастворимые соли кальция и магния. [53]

Температурные эндоэффекты при 770-800°C, подтверждающий наличие гидроалюмосиликатов кальция и натрия [58] Кроме того в связи с содержанием в образцах кристаллического окерманита, эндоэффекты в данном интервале температур также могут относиться к разложению свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Наибольшая гидратационная активность наблюдается в образце подвергнутому ТВО при 90°C в течение 10 часов. Данный факт объясняется более высокой температурной обработкой образца и как следствие сравнительно высокими показателями гидратационной активности, особенно на ранней стадии.

Для оценки поверхности композита, полученного с помощью шлакосиликатных вяжущих на основе доменного гранулированного шлака и древесной щепы, а также натриевого жидкого стекла, был проведен анализ поверхности с помощью растрового электронного микроскопа.

Фотографии поверхности структуры сделанный на растровом электронном микроскопе (x50-x150) изображены на рисунках 3.16–3.19.

Полученные данные позволяют оценить поровую структуру полученного композиционного материала. Необходимо отметить, что полученная структура равномерно распределенной пористостью с размерами пор, в основном, ≥ 1 мм.

Полученная поровая структура имеет замкнутую пористость со сплошными и ровными межпоровыми перегородками, что может способствовать меньшим показателям капиллярности, водопоглощения, сорбционного увлажнения и пр.

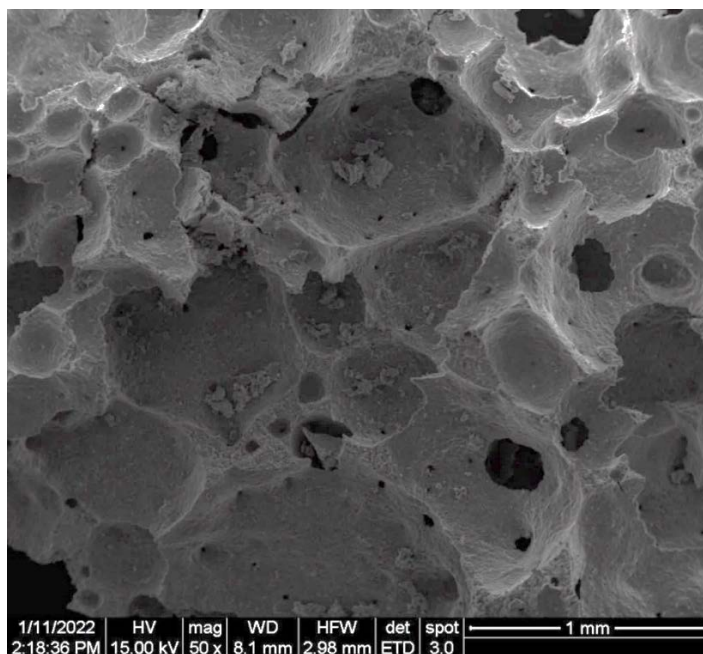


Рисунок 3.16 – Микрофотография поровой структуры композита (x50)

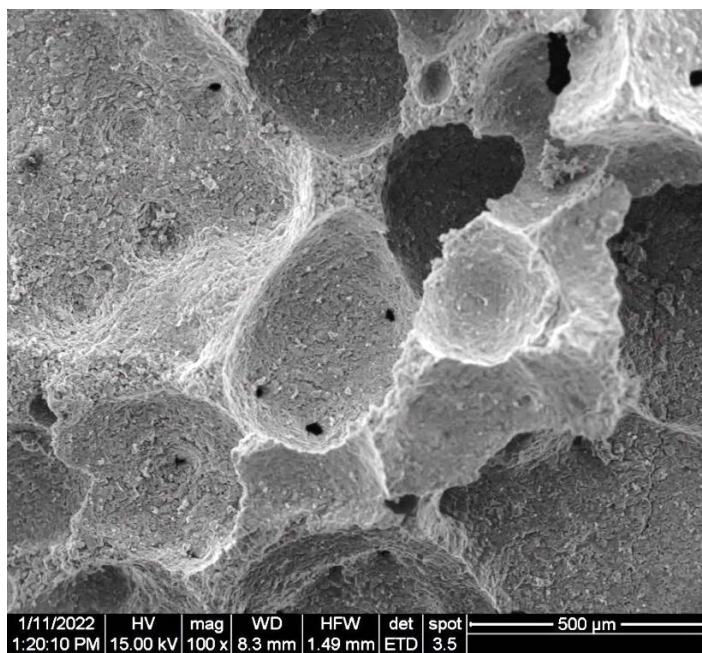


Рисунок 3.17 – Микрофотография поровой структуры композита (x100)

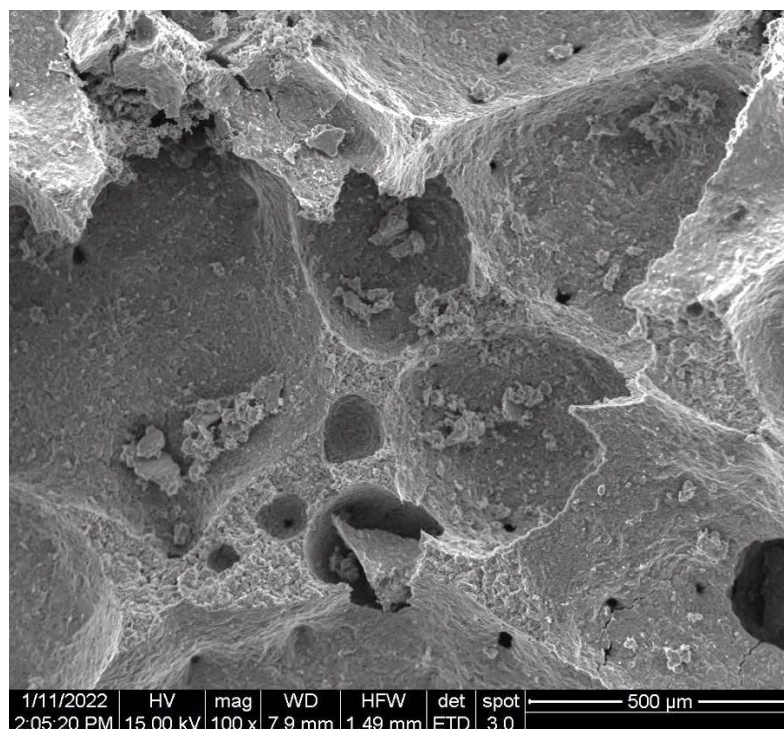


Рисунок 3.18 – Микрофотография поровой структуры композита (x100)

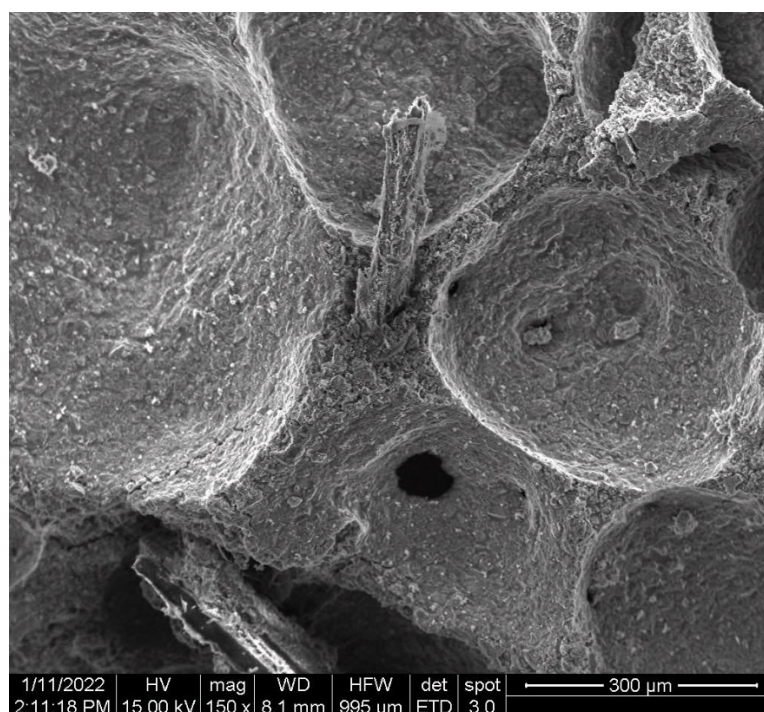


Рисунок 3.19 – Микрофотография поровой структуры композита (x150)

Анализируя полученные микрофотографии поверхности бетона с большим увеличением (x1000-x10000), изображенные на рисунках 3.20–3.22, можно заметить, что среди продуктов гидратации композиционного шлакосиликатного

поризованного арболитобетона присутствуют объёмные неправильной формы частицы в виде лепестков, которые могут быть образованы в результате адсорбции коллоидных частиц. Согласно литературным данные частицы могут относиться к гидросиликатам группы CSH(B). Проведенный химический анализ данных новообразований показал, что частицы, лепестки состоят, по большей части, из гидроалюмосиликатов кальция. Оксид цинка, присутствующий в составе новообразований, проявляя в растворе амфотерные свойства, в результате ионообменных процессов также может входить в состав новообразований. Химический анализ продуктов гидратации композиционного шлакосиликатного поризованного арболитобетона, проведенный с помощью электронного микроскопа представлен на рисунке 3.23 и в таблице 3.16.

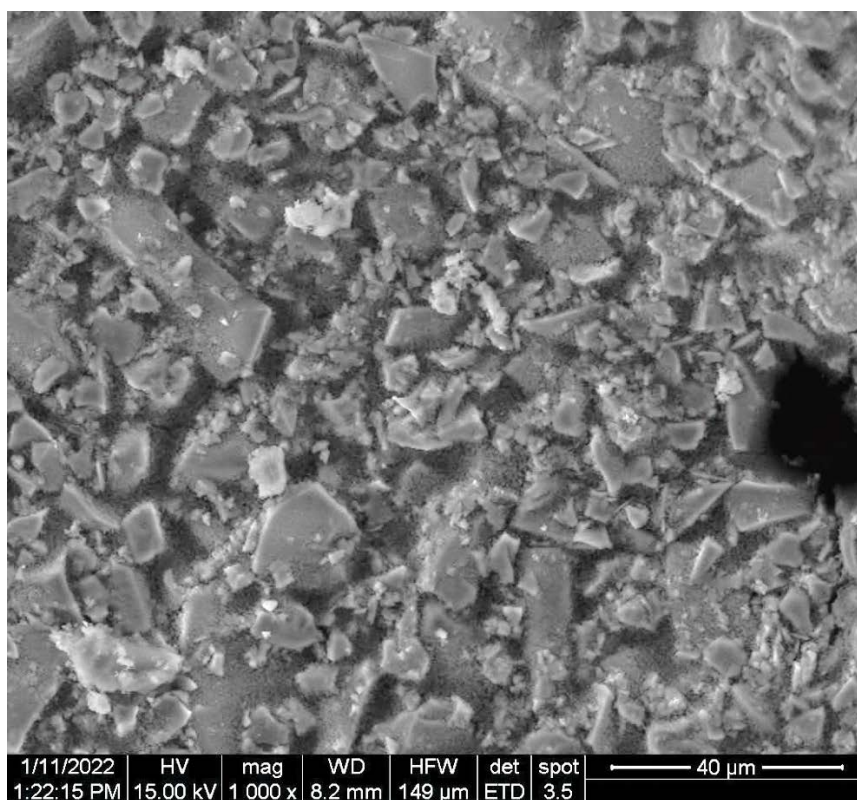


Рисунок 3.20 – Микрофотография поровой структуры композита (x1000)

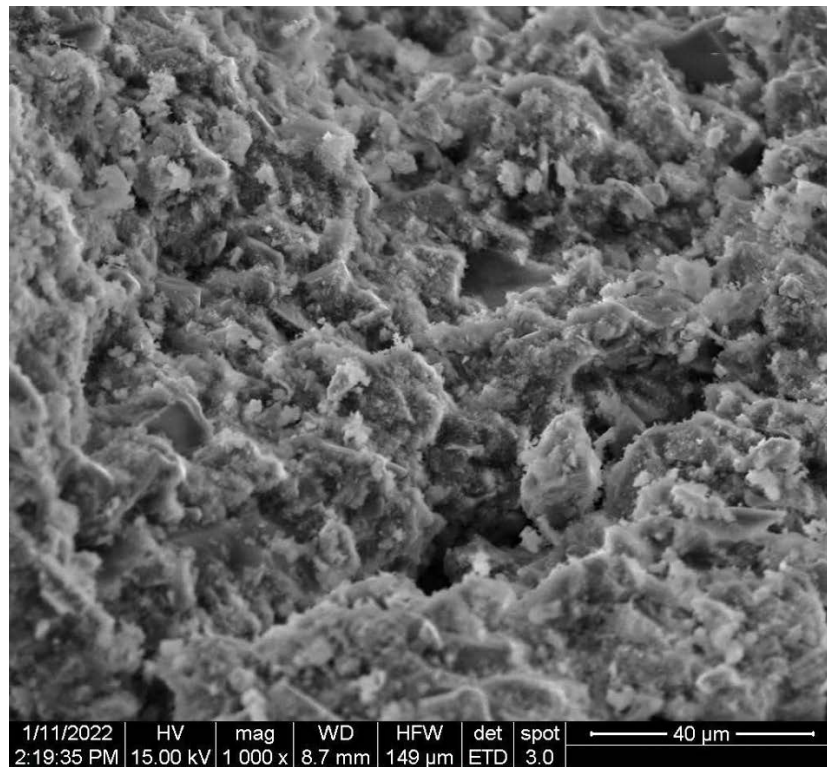


Рисунок 3.21 – Микрофотография поровой структуры композита (x1000)

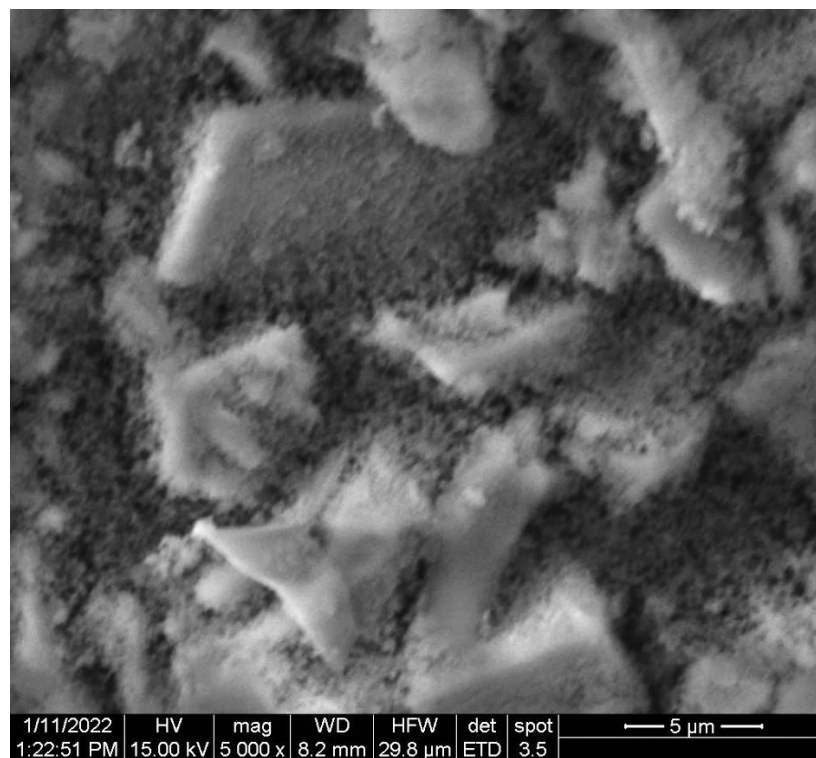


Рисунок 3.22 – Микрофотография поровой структуры композита (x1000)

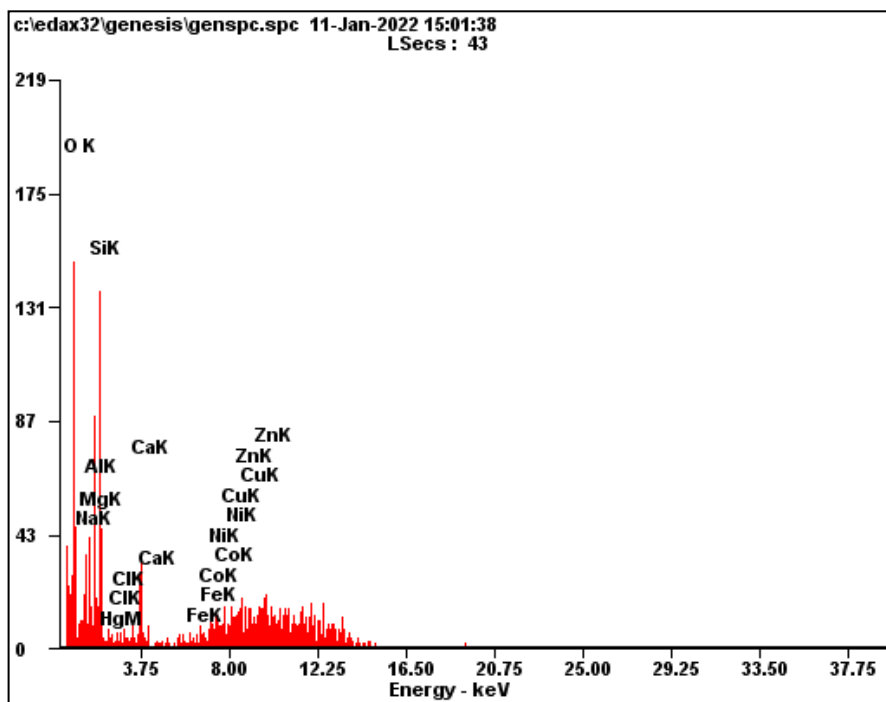


Рисунок 3.23 – Микроанализ продуктов гидратации композиционного шлакосиликатного поризованного арболитобетона

Таблица 3.16 – Химический состав продуктов гидратации композиционного шлакосиликатного поризованного арболитобетона

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	HgO ₂	Cl ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	CoO	NiO	CuO	ZnO
9,08	6,95	14,36	30,34	0,92	0,44	8,94	0,76	1,84	3,52	7,97	14,89

Полученный химический анализ композита из других мест также свидетельствует об образовании низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов различного состава. Также было установлено присутствие гелевидных фаз. Химический анализ камня, вяжущего представлен на рисунке 3.24. Количественный химический состав камня, вяжущего представлен в таблице 3.17.

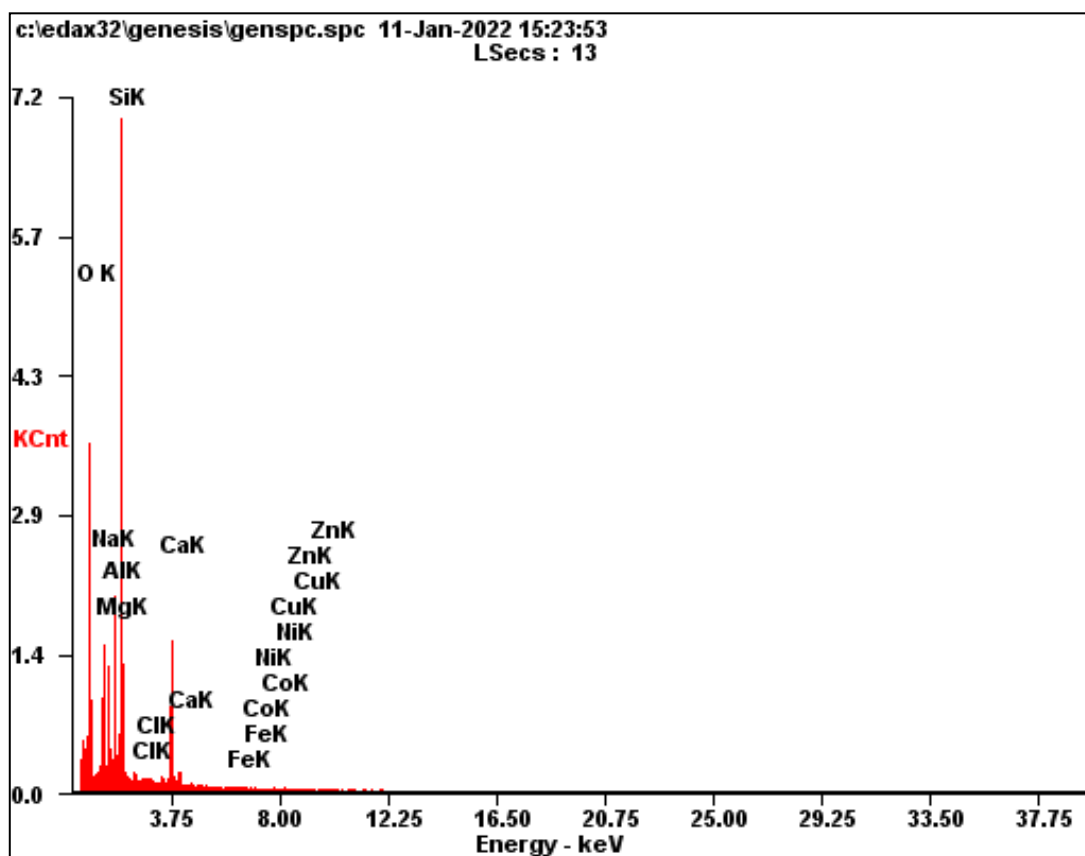


Рисунок 3.24 – Микрхимический анализ камня вяжущего

Таблица 3.17 – Химический состав камня вяжущего

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	CoO	NiO	CuO	ZnO
12,67	8,42	11,29	51,17	0,14	14,57	0,26	0,27	0,3	0,37	0,54

Изучая зону контакта шлакосиликатного поризованного композита с древесной щепой, можно отметить, что указанная граница имеет плотную, гомогенную структуру. Рассматривая частицу заполнителя, представленную на рисунке 3.25, можно сделать вывод, что на поверхности древесины происходит появление новообразований схожей природы, что и в самом шлакосиликатном камне. По мнению некоторых ученых, щелочные компоненты вяжущего выступают в роли минерализатора для древесины повышая её водостойкость, огнестойкость и т.п. Также отмечается, что при взаимодействии ионов натрия с

древесиной образуется щелочная целлюлоза, которая создает дополнительные связи в зоне контакта заполнителя с вяжущим. Исследования химического состава зоны контакта древесины с вяжущим представлены на рисунке 3.26. Количественный анализ химических элементов представлен в таблице 3.18.

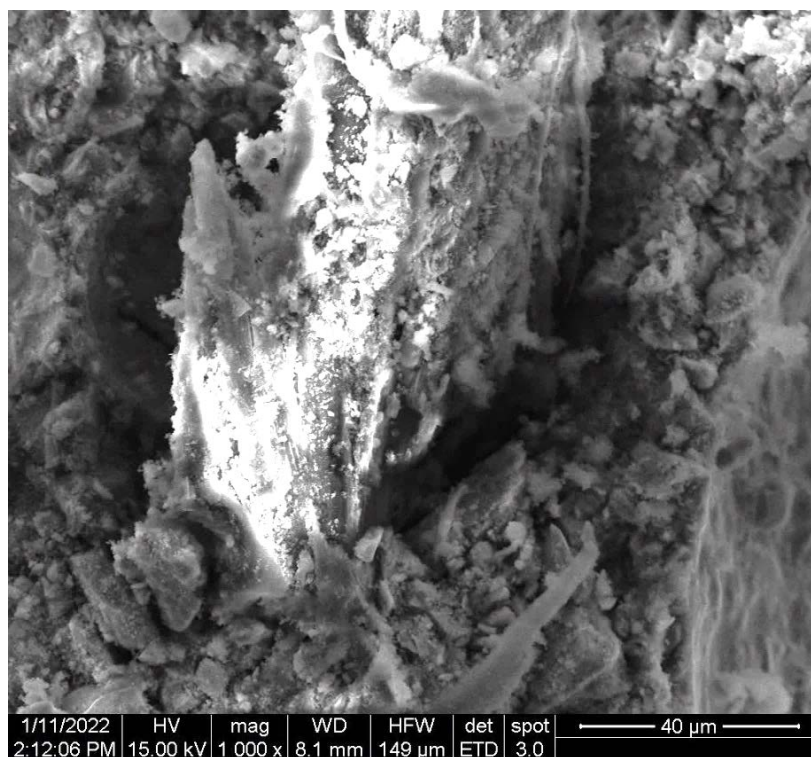


Рисунок 3.25 – Микрофотография контактной зоны (x1000)

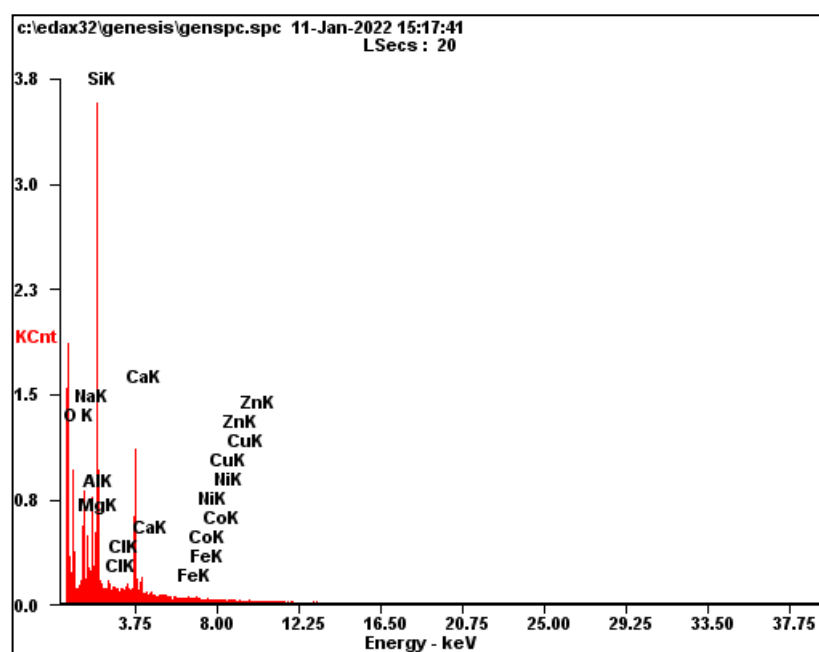


Рисунок 3.26 – Микроанализ зоны контакта заполнитель-вяжущее

Таблица 3.18 – Химический анализ зоны контакта наполнитель-вяжущее

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cl ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	CoO	NiO	CuO	ZnO
11,89	4,84	7,84	53,3	0,18	18,11	1,05	0,68	0,74	0,59	0,78

С целью установления водостойкости композиционного шлакосиликатного поризованного арболита были проведены испытания водопоглощения древесной щепы. Исследованию были подвергнуты образцы после его механического разрушения. График водопоглощения древесной щепы представлен на рисунке 3.27. Приведенные результаты показали, что показатель водопоглощения в щепе полученной непосредственно из арболита меньше на 68%.



Рисунок 3.27 – Водопоглощение древесины

ГЛАВА 4. СВОЙСТВА ПОРИЗОВАННОГО АРБОЛИТОВОГО КОМПОЗИТА

4.1. Физико-механические свойства арболитового материала

Физико-механические свойства полученного арболитового материала изучались проведением испытаний образцов балочек. Были определены их основные физико-механические свойства: прочность при изгибе и плотность. Результаты испытаний образцов композита представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства арболитового материала

Наименование замеса	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

В результате анализа результатов испытаний образцов установлены зависимости описывающие его основные физико-механические свойства. На рисунках 4.1 и 4.2 представлены зависимости прочности композита от плотности и от отношения затворитель/шлак.

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.

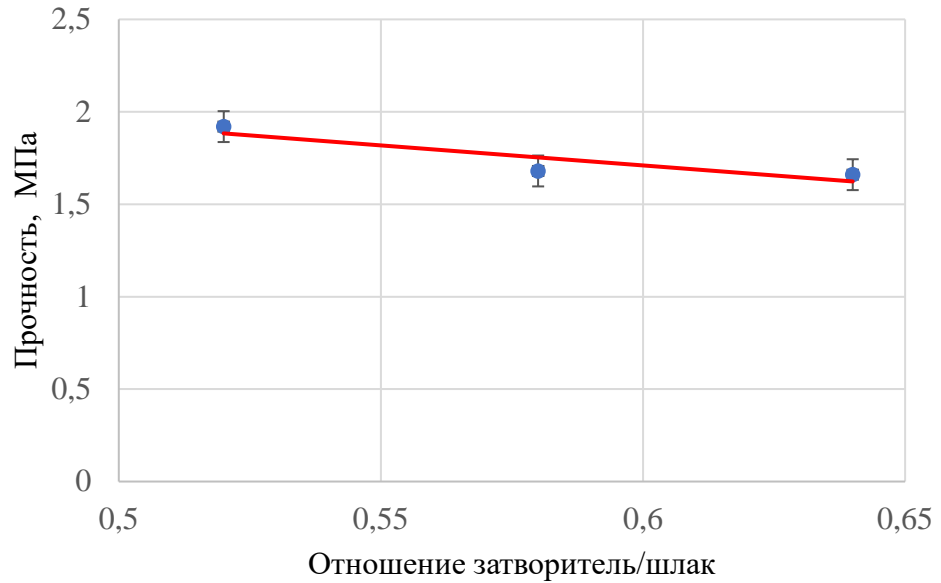


Рисунок 4.1 – Зависимость прочности полученного композита от отношения затворитель/шлак

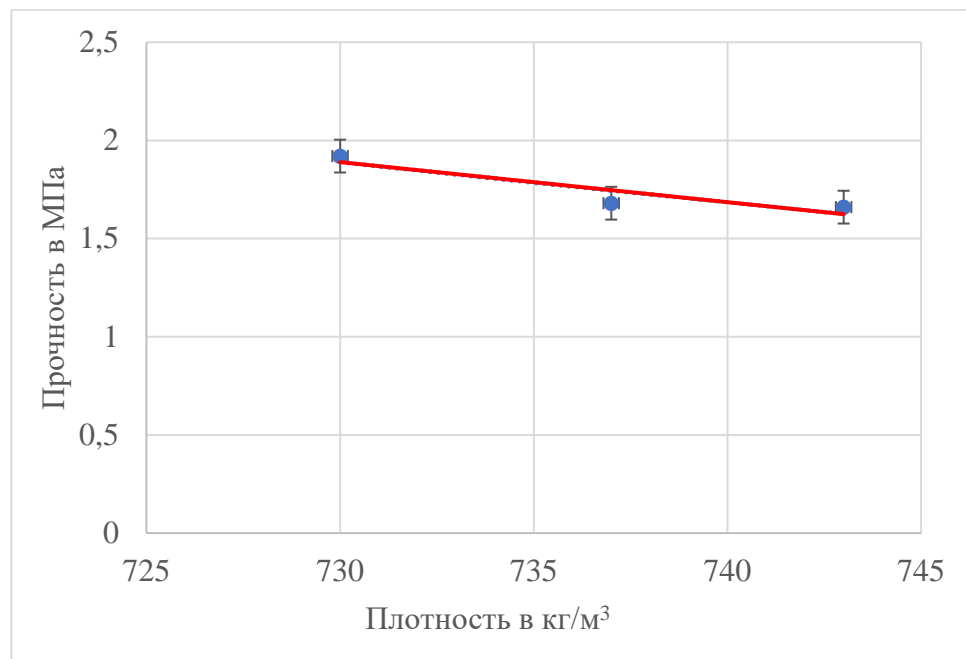


Рисунок 4.2 – Зависимость прочности полученного композита от его плотности

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.

Изучение физико-механических характеристик образцов из шлакосиликатного поризованного арболита, полученных в результате подбора и оптимизации состава композита с помощью метода математического планирования эксперимента, показали, что доменный гранулированный шлак полусухого способа грануляции, содержащий 85% и более аморфной фазы с дисперсностью 450 – 500 м²/кг, натриевое жидкое стекло плотностью – 1,31 г/см³, щепа хвойных пород древесины, а также техническая пена с оптимальными параметрами качества являются эффективными компонентами для производства конструкционно-теплоизоляционного арболита высокого качества. В таблице 4.2, показаны результаты определения основных физико-механических свойств полученных композиций.

Таблица 4.2 – Основные физико-механические свойства полученных композиций

Наименование состава	Плотность в сух. сотс., кг/м ³	Плотность в ест. сост., кг/м ³	R _{ср.} ,28 сут. (Мпа)	К.К.К*
S1	552	619	1,38	2,23
S2	640	730	2,78	3,81
S3	575	644	2,38	3,70
S4	668	755	3,65	4,84
S5	546	623	1,40	2,25
S6	680	762	3,33	4,38
S7	593	677	1,34	1,98
S8	627	715	1,75	2,45
S9	607	686	1,50	2,19

* К.К.К. – коэффициент конструктивного качества.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что физико-механические параметры поризованного арболита зависят от многих параметров, одними из основных параметров, которые нужно учитывать при выборе оптимального состава это расходы заполнителя, вяжущего и соотношение раствор/шлак.

При этом установлено, что серьезное влияние на свойства получаемого композита оказывает соотношение затворитель/шлак. По некоторым данным, оптимальное раствор-шлаковое соотношение для такого вида бетонов достигается при такой консистенции смеси, при которой она, при сжатии её рукой комкуется без отделения затворителя, так называемого «цементного молока».

При этом достижение оптимального значения данного показателя, дальнейшее его изменение возможно только в очень малом его промежутке. Данное явление связано со способностью заполнителя активно поглощать раствор щелочного активизатора, что может приводить к обезвоживанию раствора, в том числе, контактной зоны заполнитель-вяжущее. Кроме того, как уже было показано ранее на примере шлакосиликатного арболита, повышенный расход щелочного активизатора приводит к снижению прочности, а также увеличению процента влажности композита. Помимо этого, переизбыток жидкой части при формовании, может привести к расслоению смеси. Однако, повышенный расход затворителя, положительно влияет на реологические свойства, в том числе на удобоукладываемость.

Поэтому для получения высококачественного композита необходимо поддерживать оптимальные значения раствора-шлакового отношения, которые могли бы обеспечить высокие физико-механические показатели получаемого композита, а также не нарушили бы удобоукладываемость. Экспериментально было установлено, что оптимальное соотношение затворитель/шлак, до введения технической пены, при условии применения использованных в работе материалов, находится на уровне 0,7.

Данные, полученные в результате испытаний по определению физико-механических характеристик: прочности и плотности, подтверждают результаты, полученные в ходе анализа составов с помощью метода двухфакторного композиционного эксперимента. На повышение прочности и коэффициента конструктивного качества (К.К.К.) влияет, в основном, количество вяжущего и в меньшей степени количество заполнителя. В то же время на изменение

показателей плотности в большей степени влияет количество шлака и в меньшей степени количество щепы, а также сочетание этих двух факторов.

4.2. Водопоглощение композиционного арболитового материала

Оценку водопоглощения полученного композиционного материала проводили по показателям водопоглощения по объему и водопоглощения по массе образца. Определение физико-механических характеристик композиционного арболитового материала, в том числе водопоглощение проводилось для состава S9, с маркой по плотности D600 и прочности 1,50МПа.

Оценку водопоглощения полученного композиционного материала проводили по показателям водопоглощения по объему (W_o) и водопоглощения по массе (W_m) образца. Расчет данных показателей проводили по формулам (4.1) и (4.2).

$$W_m = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} * 100\% \quad (4.1)$$

$$W_o = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{V_{\text{сух}} * \rho_{\text{воды}}} * 100\% = W_m * d \quad (4.2)$$

Где $m_{\text{нас}}$ – масса образца в насыщенном водой состоянии, $m_{\text{сух}}$ – масса образца в сухом состоянии, $V_{\text{сух}}$ – объём материала в сухом состоянии, $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды, равная г/см³, d – относительная плотность.

В результате проведенных экспериментов были установлены значения водопоглощения по массе и объёму, значения которых находятся на уровне 74,25% и 51,38% соответственно. По установленному значению W_o легко определить объем открытых капиллярных пор, данное значение для полученного композита равно водопоглощению по объёму и составляет 51,38%.

Полученные значения водопоглощения свидетельствуют о высокой пористости полученного композита, кроме того, на данный показатель оказывает значительное влияние водопоглощение заполнителя.

Для уменьшения водопоглощения поризованного композита могут применять различные минеральные добавки, в том числе цеолиты, а также гидрофобизаторы и гидроизоляция.

Показатель коэффициента размягчения (K_p) рассчитывался как отношения прочности образца в насыщенном водой состоянии, к прочности образца в сухом состоянии. В результате экспериментов было установлено, что данный показатель для полученного поризованного композита равен 0,63. Полученные экспериментально-расчетные показатели поризованного арболитового материала представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Основные показатели поризованного арболитового материала

Наименование состава по табл. 4.2	Характеристика	Ед. изм.	Значение
S9	Объем открытых капиллярных пор (W_o)	%	51,38
	W_m , %	%	74,25
	W_o , %	%	51,38
	Коэффициента размягчения K_p	-	0,63

Анализируя полученные данные, можно прийти к выводу, что полученный в работе композит обладает не высокими показателями водостойкости и коэффициента размягчения. Данные значения показателей, возможно, следует объяснять высокой пористостью матрицы композита, а также водопоглощением заполнителя в виде древесной щепы хвойных пород. Последняя при насыщении водой может увеличиваться в объеме деформируя матрицу композита, что приводит к снижению прочности.

Рассматривая вопрос применения полученного материала в строительстве, следует отметить, что данный композит, без применения мер защиты от намокания, пригоден для использования в помещениях с нормальным влажностным режимом.

4.3. Теплопроводность шлакосиликатного поризованного арболитового материала

Теплопроводность полученного композиционного поризованного арболита измерялась на приборе ИТП-МГ4, по методике испытаний для данного прибора.

Согласно полученным данным для состава со средней плотностью в сухом состоянии 600 кг/м^3 теплопроводность находилась на уровне $0,081 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Нами был проведен сравнительный анализ с технических показателей похожих материалов. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение теплопроводности различных материалов

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

Более низкие показатели теплопроводности, при одинаковых значениях плотности относительно ячеистых композитных материалов, в том числе поризованных арболитов на основе портландцемента, могут быть объяснены высокой пористостью, а также равномерностью распределения пор в материале. Кроме того, такие результаты могут быть объяснены фазовым составом образцов, содержащих кристаллическую и аморфную составляющую, с преобладанием последней.

Согласно теории переноса теплоты в твердом теле, механизм переноса тепловой энергии зависит от характера движения тепловых потоков в нем. Опираясь на положения теоретической физики, возникновение тепловых волн в твердом теле сопровождается переносом энергии, которое эквивалентно распространению квантов энергии квазичастиц, которые называются фононами [148].

Явление снижения теплопроводности веществ в аморфном состоянии вещества, относительно кристаллических связано со значением средней длины свободного пробега фононов, а также её зависимостью от температуры и размеров структурных ячеек материалов [148].

Кроме того, теплопроводность материалов со смешанной аморфно-кристаллической структурой, также характеризуются более низкими значениями теплопроводности относительно материалов с кристаллической структурой. Данный факт объясняется аморфной структурой материала, а также высокой величиной теплового сопротивления в местах сопряжения аморфной и кристаллической составляющих. Это, по-видимому, связано с многократным увеличением количества дефектов решетки в пограничной зоне, являющихся причиной рассеивания фононов [148].

Обладая низкими показателями теплопроводности по сравнению с основными конкурентами (пенобетон, газобетон, арболит и пр.), при одинаковых значениях средней плотности, разработанный шлакосиликатный поризованный арболитовый композит, при условии использовании специальных мер защиты от намокания, может применяться в качестве конструкционно-теплоизоляционного бетона в конструкциях различного назначения, без использования дополнительного утепления.

4.4. Модуль упругости и усадка поризованного арболитового композиционного материала

Модуль упругости полученного композиционного поризованного арболита определялся для образцов, твердевших в условиях ТВО при 90°C в течение 8

часов и в лабораторных условиях в течение 28 суток., основываясь на зависимостях, полученных в работе [18,60] для ячеистого бетона. Значение модуля упругости для образцов композита рассчитывалось по формуле 4.3.

$$E = 594.86e^{0.0017*\rho} \quad (4.3)$$

В результате полученных данных были установлены зависимости значений модуля упругости E от плотности поризованного композиционного материала твердевших в условиях ТВО при температуре 90°C в течение 8 часов. На рисунке 4.3, приведена зависимости модуля упругости от плотности материала, твердевшего в условиях ТВО.

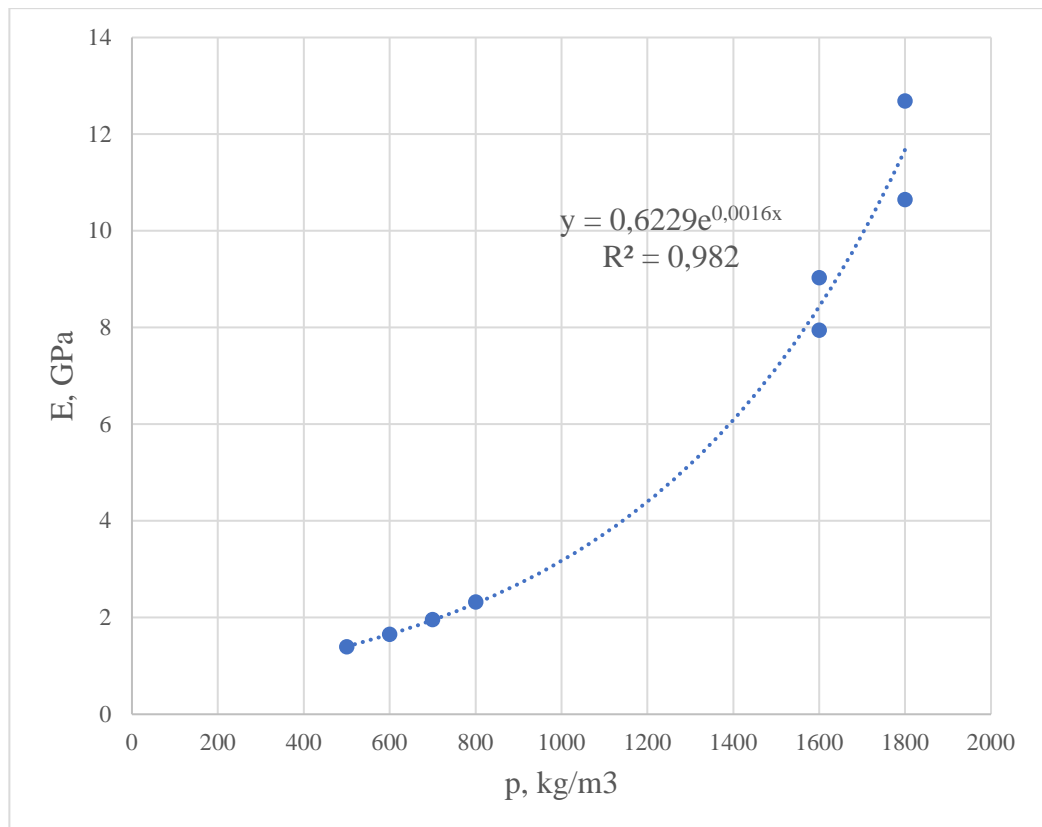


Рисунок 4.3 – Зависимость значения модуля упругости от плотности материала

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.

Результаты, полученные при определении усадки при высыхании образцов шлакосиликатного поризованного арболитового материала показали, 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. На рисунке 4.4 представлены результаты определения усадки полученного арболитового композита.

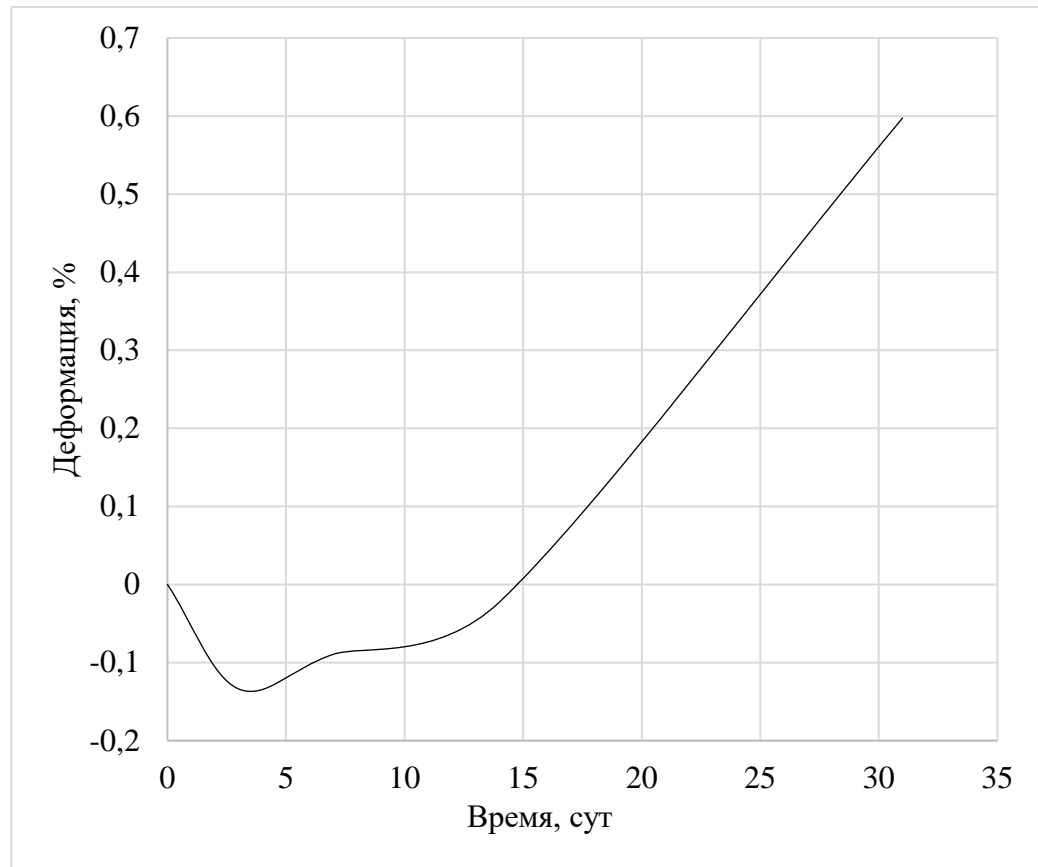


Рисунок 4.4 – Деформации усадки и расширения композита

4.5. Влияние режимов ТВО на физико-механические характеристики поризованного композиционного арболитового материала

Тепловлажностная обработка (ТВО) полученного поризованного композиционного арболитового материала проводилась с целью интенсификации процессов гидратации и структурообразования в твердеющем шлакосиликатном поризованном арболитовом материале. Обработка осуществлялась при нормальном атмосферном давлении в камере непрерывного действия при температуре изотермического прогрева равной 80°C и 90°C а также времени изотермической выдержки равном: 6, 8, 10, 12 часов. Результаты проведенных по определению физико-механических характеристик полученных составов (S1 – S9) композита приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Физико-механических характеристик арболитовых составов осле ТВО

Номер состава	Прочность образцов (МПа) после ТВО при 80°C в течение, час				Прочность образцов (МПа) после ТВО при 90°C в течение, час	
	6 часов	8 часов	10 часов	12 часов	8 часов	10 часов
S1	1,27	1,45	1,59	1,65	1,73	1,76
S2	2,51	2,95	3,17	3,37	3,54	3,6
S3	2,19	2,50	2,72	2,84	3,03	3,1
S4	3,29	3,87	4,20	4,38	4,57	4,65
S5	1,29	1,47	1,60	1,7	1,75	1,82
S6	3,00	3,53	3,80	4,03	4,23	4,32
S7	1,24	1,43	1,53	1,61	1,71	1,78
S8	1,60	1,86	2,00	2,1	2,21	2,27
S9	1,35	1,59	1,73	1,82	1,91	1,98

Согласно полученным данным, были построены графики зависимости прочности (МПа) от режима ТВО. Полученные зависимости изображены на рисунке 4.5.

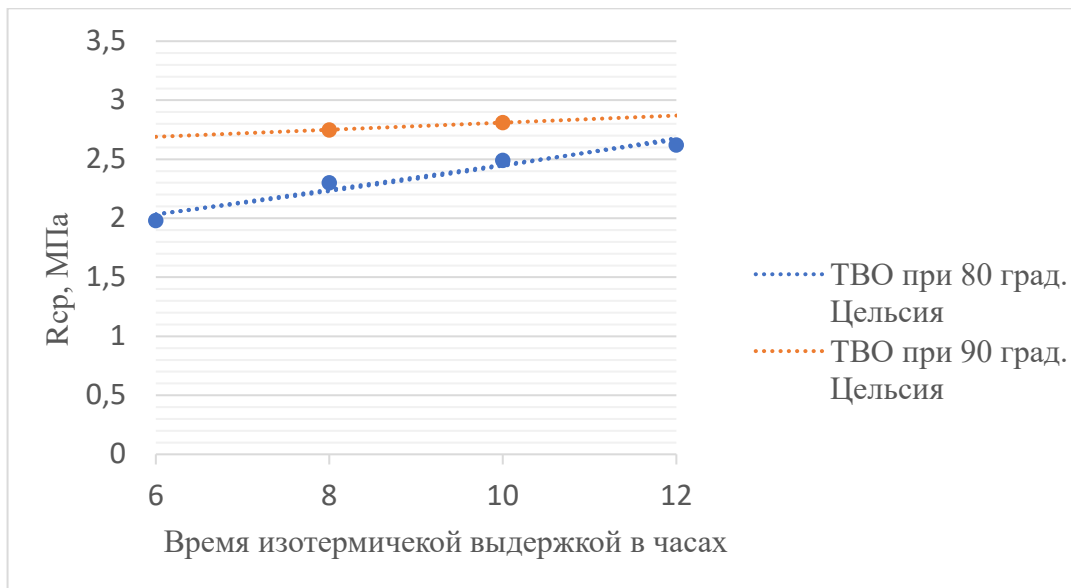


Рисунок 4.5. Зависимость прочности шлакосиликатного поризованного арболитового композита от режима ТВО

В результате экспериментов было установлено положительное влияние ТВО при температурах 80°C и 90°C и длительностью изотермической выдержки от 6 до 12 часов на структуру и свойства шлакосиликатного поризованного арболита. Было выяснено, что на прочность арболита наиболее благоприятно влияют режимы твердения, осуществляющиеся при 80°C в течение 10 часов. При этом достигается прочность на 10–15% выше прочности 28-ми суточных образцов. Дальнейшее увеличение времени изотермической выдержки при данной температуре незначительно влияет на физико-механические характеристики шлакосиликатного поризованного арболитового композита. Вместе с тем испытания образцов, твердевших в условиях ТВО при 90°C, показали, что оптимальная прочность бетона достигается уже при выдержке в течение 8 часов. Прирост прочности относительно 28-ми суточных образцов составляет более 20%.

Кроме того, повышение температуры на 10 градусов способствует более интенсивному протеканию процессов новообразований в бетоне шлакосиликатном поризованном арболитовом композите, что в положительной степени сказывается на отпускной прочности образцов. Так наблюдается прирост прочности в 16% у образцов подвергавшихся ТВО при 90°C в течение 8 часов относительно образцов прошедших ТВО при 80°C и за тоже время. Увеличение

времени ТВО образцов при 90°C с 8 до 10 часов не ведет к значительному повышению прочности, поэтому дальнейшее увеличение времени теоретически и практически нецелесообразно.

Выводы по Главе 4

1. 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 – 1,31 г/см³ и щепа 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.

2. Определены рецептурные составы поризованного шлакосиликатного композиционного арболита. Получен композит с маркой по плотности D600 и прочностью 1,50 МПа. С помощью математических методов двухфакторного композиционного эксперимента были проанализированы основные зависимости связывающие его физико-механические характеристики с расходом основных компонентов: доменного гранулированного шлака и древесной щепы хвойных пород. Экспериментально установлено, что для достижения необходимой текучести смеси до введения в неё технической пены, для получения композита с высокими физико-механическими характеристиками необходимое растворо-шлаковое отношение, при условии использования примененных в работе материалов, находится на уровне 0,7.

3. 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 плотности в большей степени влияет количество шлака и в меньшей степени количество щепы, а также сочетание этих двух факторов.

2. Определены показатели водопоглощения по массе (W_m) и объёму (W_o) композита, значения которых составляют 74,25% и 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.

3. Установлены зависимости значения модуля упругости от плотности образцов шлакосиликатного поризованного арболита. Полученные зависимости свидетельствуют об увеличении значения модуля упругости при росте средней плотности. Показано, что 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 GPa.

4. Установлено, что при высыхании образцов шлакосиликатного поризованного арболитового материала в период с 1 до 13 суток идет интенсивное высыхание образцов, которое сопровождается усадкой, при этом значения деформации достигает 0,1 – 0,15%. Однако начиная с 15 суток испытания образец активно расширяется и на 31 сутки его деформация при расширении может достигать 0,5-0,6%. Подобные деформационные процессы, возможно, связаны с высокой гигроскопичностью материала.

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

ГЛАВА 5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ПОРИЗОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ АРБОЛИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ШЛАКОСИЛИКАТНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

5.1. Выпуск опытно промышленной партии

Апробирование полученных в результате работы составов шлакосиликатного поризованного арболита полученного с использованием отходов промышленных предприятий черной металлургии и деревообрабатывающей промышленности, а именно доменного гранулированного шлака и древесной щепы хвойных пород, а также натриевого жидкого стекла в качестве активизатора твердения и технической пены с оптимальными параметрами качества проводились на базе департамента технического развития исследовательско-технологического отдела ООО «Мечел-Материалы» (Приложение А)

В качестве вяжущего использовался доменный гранулированный шлак, предоставленный ООО «Мечел-Материалы», с модулем основности равным 1,27 и удельной поверхностью равной 517 кг/м². В качестве заполнителя использовалась древесная щепа хвойных пород с насыпной плотностью 120 кг/м³ и влажностью 12%. В качестве затворителя использовалось натриевое жидкое стекло с силикатным модулем 2 и плотностью 1310 кг/м³. Для приготовления пены использовался синтетический пенообразователь «ПБ Люкс», концентрация раствора пенообразователя была на уровне 3,3%.

Смешивание компонентов производилось в бетоносмесителе лопастного типа. Компоненты состава (доменный гранулированный шлак, древесная щепа, натриевое жидкое стекло и техническая пена) дозировались в необходимом количестве, согласно расчету, для получения заданного объема смеси. При этом в первую очередь в смеситель дозировались древесная дробленка и доменный шлак, которые в последствие перемешивались в течение 2 минут. Далее в

бетоносмеситель в необходимом количестве добавляли натриевое жидкое стекло и перемешивали 3–4 минуты, до получения гомогенной арболитовой смеси. На последнем этапе в смесь в необходимом количестве добавлялась свежеприготовленная техническая пена. При этом пену, для принятого расхода компонентов, добавляли до достижения смесью расчётной ожидаемой плотности поризованного арболита ($\rho_{\text{св.ул}}$).

В ходе приготовления поризованной арболитовой смеси, а также её формовании и последующем твердении технологических затруднений не наблюдалось.

Разработанный композиционный материал может применяться в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений индивидуального жилищного строительства, а также в качестве самонесущих стен и перегородок. Данный материал может быть использован как альтернатива пено- и газобетонам, а также изделиям из арболита неавтоклавного твердения изготовленных на основании требований ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия», а также ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

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. Необходимо отметить, что технология производства поризованного арболита с использованием вяжущего на основе портландцемента уже находит свое применение в строительной отрасли. Поэтому производство нового композиционного материала имеет базовую подоснову.

Готовый материал имеет следующие характеристики: средняя плотность 600–700 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,081 Вт/(м°С), прочность при сжатии не менее 1,9 МПа.

Таблица 5.1 - 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.

5.2. Экологическая и экономическая эффективность полученного шлакосиликатного поризованного арболитового материала

Экономическая эффективность полученного шлакосиликатного поризованного арболита достигается в первую очередь за счет замены дорогостоящего портландцемента более дешевыми вяжущим материалом на основе доменного гранулированного шлака, который является отходом производства предприятий черной металлургии. Кроме этого, эффективность полученного арболитового материала, заключается в устранении цикла выдержки древесной щепы, а также устранении необходимости введения химических добавок, которые призваны уменьшать действие так называемых экстрактивных веществ древесины, «цементных ядов», тем самым сокращается производственный цикл по выпуску продукции.

Согласно нормативно-технической документации (ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия») Шлакосиликатные поризованные арболитовые материалы относятся к 3-му классу опасности по ГОСТ 12.1.007 и являются биостойким материалом.

Шлакосиликатные поризованные арболитовые материалы получены на основе экологически чистых компонентов, поэтому при производстве и применении не оказывает вредного воздействия на организм человека. Такие материалы алергобезопасны, при контакте оказывает слабое раздражающее воздействие на кожу и слизистые. Частицы арболита не проникают через неповрежденные кожные покровы.

Кроме того, использование отходов промышленности для производства композиционных поризованных арболитовых материалов, а именно доменных гранулированных шлаков и отходов древесины, способствует снижению количества промышленных отходов в районах действия предприятий.

Выводы по Главе 5

1. Полученные результаты и сделанные выводы по рецептурным составам композиционных поризованных арболитовых материалов и полученным физико-механическим и техническим характеристикам позволяют повысить эффективность арболитов. Данные результаты были внедрены на предприятии ООО «Мечел-Материалы» (Приложение А). 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.

2. Разработанный шлакосиликатный поризованный арболит кроме высоких физико-механических показателей обладает низкой теплопроводностью, что в свою очередь позволяет снизить себестоимость строительства, за счет исключения необходимости дополнительного утепления. Необходимо отметить, что технология производства поризованного арболита с использованием

вяжущего на основе портландцемента уже находит свое применение в строительной отрасли.

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.

Итоги выполненного исследования:

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 окерманит. При этом самое высокое их содержание наблюдается в образце, твердевшем в условиях ТВО при 90°С 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 – 1,31 г/см³ и щепа 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 D600 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 600кг/м³ составил 0,081 Вт/(м*С°), а модуль упругости находился на уровне 1,69 GPa.

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.

1. 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.

2. 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miller S.A. et al. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050 // *Cem. Concr. Res.* 2018. Vol. 114. P. 115–124.
2. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cem. Concr. Res.* 2018. Vol. 114. P. 2–26.
3. Sidhi J. et al. A Review Article on Manufacturing Process of Cement, Environmental Attributes, Topography and Climatological Data Station: IMD, Sidhi M.P. 2016. P. 47–53.
4. Syamala Devi K., Vijayalakshmi V., Alakanandana A. Impacts of Cement Industry on Environment - An Overview // *Asia Pacific J. Res.* 2017. Vol. 1, № 57. P. 156–161.
5. Mehta P.K. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development // *Concr. Int.* 2002. Vol. 24. P. 23–28.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности // Учебно-справочное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. P. 368.
7. Шаталова А.О., Саликов К.Д. Анализ применения инновационных строительных материалов из древесного сырья // *Инновации, технологии и бизнес.* 2021. Vol. 1, № 9. P. 88–93.
8. Рыбьев И.А., Клименко М.И. Исследование общих закономерностей в структуре и свойствах арболита // *Строительство и архитектура.* 1972. № 2. P. 16–19.
9. Тинников А.А., Скрипкин Б.К. Новые виды древесных бетонов // *Комплексное использование древесного сырья: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф.* Рига, 1984. P. 48–49.
10. Coatanlem P., Jauberthie R., Rendell F. Lightweight wood chipping concrete durability // *Constr. Build. Mater.* 2006. Vol. 20, № 9. P. 776–781.
11. Berzins A. et al. Mechanical properties of wood-geopolymer composite // *Engineering for Rural Development.* 2017. Vol. 16, № May. P. 1167–1173.

12. Xu R. et al. Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 208. P. 242–249.
13. Pavlíková M. et al. Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design // *Waste Manag.* 2018. Vol. 80. P. 89–100.
14. Sarmin S.N. et al. Investigating the possibility of geopolymer to produce inorganic-bonded wood composites for multifunctional construction material - A review // *BioResources.* 2014. Vol. 9, № 4. P. 7941–7950.
15. Пономаренко Б.Н. Арболит в сельском строительстве. Краснодар: Кн. изд-во, 1973. 143 p.
16. Разумовский В.Г., Свиридов С.Г., Смирнов Б.Н. Производство и применение арболита / ed. Хасдана С.М. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 215 p.
17. Пономаренко Б.Н. Индустриальные конструкции из арболита на местных заполнителях (по материалам Краснодарского края): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Б.Н. Пономаренко. Ростов-н/Д: Ростов. инж.-строит. ин-т, 1974. 16 p.
18. Исакулов Б.Р., Байбулов А.К., Иваницкая Н.В. Study of strength formation mechanism and destruction of sulfur-containing wood concrete composites under various loads // *Bull. L.N. Gumilyov Eurasian Natl. Univ. Tech. Sci. Technol. Ser.* 2019. Vol. 127, № 1. P. 32–40.
19. Kochavi E. et al. Numerical Modeling of Composite Concrete Walls // *Volume 2: Automotive Systems; Bioengineering and Biomedical Technology; Computational Mechanics; Controls; Dynamical Systems.* ASMEDC, 2008. Vol. 2, № January. P. 349–356.
20. Hughes J.J., Somers E. Evaluation of Durisol Sound Wall / ed. Section P.D. of T.V. of C. and M.E.T. Washington, 2000. 29 p.
21. Минас А.И., Наназашвили И.Х. Специфические свойства арболита // *Бетон и железобетон.* 1978. Vol. 6. P. 14–16.
22. Наназашвили И.Х. Арболит - эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 14 p.

23. Горшков А.С. et al. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеисто-бетонных изделий за счет использования в кладке полиуретанового клея // Строительные материалы. 2014. Vol. 5. P. 57–64.
24. Карпенко Д.А., Карамышева А.А. Теплотехнические свойства наружных стен высотных зданий. 2012. Vol. 10,5, № 25. P. 207–208.
25. Koohestani B. et al. Experimental investigation of mechanical and microstructural properties of cemented paste backfill containing maple-wood filler // Constr. Build. Mater. 2016. Vol. 121. P. 222–228.
26. Sudin R., Swamy N. Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration // J. Mater. Sci. 2006. Vol. 41. P. 6917–6924.
27. Mohammed L. et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications // Int. J. Polym. Sci. / ed. Kovalcik A. Hindawi Publishing Corporation, 2015. Vol. 2015. P. 243947.
28. Mohammed B., Abdullahi M., Hoong C.K. Statistical models for concrete containing wood chipping as partial replacement to fine aggregate // Constr. Build. Mater. 2014. Vol. 55. P. 13–19.
29. Hameury S., Lundström T. Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: In situ measurement campaign // Energy Build. 2004. Vol. 36. P. 281–292.
30. Kunzel H.M. et al. Moisture buffering effect of Interior linings made from wood or wood based products. Stuttgart, 2004. Vol. 49. 48 p.
31. Okino E.Y. et al. Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood // Cem. Concr. Compos. 2004. Vol. 26, № 6. P. 729–734.
32. Бужевич В.А., Савин В.И., Абраменков В.И. Свойства и области применения поризованного арболита // Новые технологии и свойства легких бетонов. 1980. P. 93–99.
33. Рекомендации по изготовлению изделий из керамзитобетона, поризованного вязкой пеной. Москва, 1984. 36 p.
34. Меркин А.П., Кобидзе Т.Е. Особенности структуры и основы технологии получения эффективных пенобетонных материалов // Строительные

- материалы. 1988. Vol. 3. P. 12–14.
35. Щибря А.. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге: дис. ... канд. техн. наук:05.23.05. Кубанский государственный технологический университет, 200 AD. 172 p.
 36. Рекомендации по расчету и изготовлению изделий из поризованного арболита. Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1983. 64 p.
 37. Наназашвили И.Л. Строительные материалы из древесно-цементной композиции. 2nd ed. Ленинград: Стройздат, 1990. 415 p.
 38. Kevern J., Wang K., Schaefer V. Effect of Coarse Aggregate on the Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete // J. Mater. Civ. Eng. - J MATER Civ. ENG. 2010. Vol. 22. P. 469–475.
 39. Kevern J., Biddle D., Nowasell Q. Effects of Macrosynthetic Fibers on Pervious Concrete Properties // J. Mater. Civ. Eng. 2014. Vol. 27. P. 6014031.
 40. Касимов И.К., Камилов Х., Тулаганов А.. Состав, свойства и технология шлакощелочного арболита на основе сельскохозяйственных отходов // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции. Тезисы докладов 3-й Всесоюзной научно-практической конференций. В 2-х томах. Киев: КИСИ, 1989. P. 152–153.
 41. Касимов О.Б. Шлакощелочной конструкционный арболит на основе местных отходов сельского хозяйства: автореф. дис. канд. техн. наук. Киев. 1990. 17 p.
 42. Краснюк А.Г., Новацкая Л.А. Влияние модифицированных лигносульфонатов на свойства бетона // Строительные материалы и конструкций. 1982. Vol. 3. P. 15–20.
 43. Щербаков А.С. Влияние свойств исходных материалов и технологических факторов на прочность арболита // Лесозэксплуатация и лесное хозяйство. 1966. Vol. 32. P. 17–20.
 44. Бабийчук И.П. Шлакощелочные бетоны на органических заполнителях // Цемент. 1991. Vol. 3, № 4. P. 46–49.
 45. Логвиненко А.Т., Урваева Т.Д., Третьякова А.С. Влияние органических

- добавок на гидратацию, портландцемента // Известия СО АН СССР. 1970. Vol. 3, № 5. P. 125–133.
46. Хрулев В.М., Тинников А.А., Селиванов В.М. ДЕРЕВОБЕТОН НА ШЛАКОЩЕЛОЧНОМ ВЯЖУЩЕМ // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции: Тез. докл. II Всесоюз. научн. - практ. конф. 1984. P. 136–237.
47. Dvornikov R., Velichko E. Wood Concrete Modified with Ground Granulated Blast Furnace Slag // Constr. Unique Build. Struct. 2020. Vol. 91, № 6. P. 9107–9107.
48. Peng H. et al. Bioconversion of different sizes of microcrystalline cellulose pretreated by microwave irradiation with/without NaOH // Appl. Energy. 2014. Vol. 117. P. 142–148.
49. Malenab R., Ngo J., Promentilla M. Chemical Treatment of Waste Abaca for Natural Fiber-Reinforced Geopolymer Composite // Materials (Basel). 2017. Vol. 10, № 6. P. 579.
50. Касимов И.К., Тулаганов А.А., Шиджалилова Г.К. Эффективный материал из стеблей хлопчатника и шлакощелочного вяжущего // Строительные композиционные материалы на основе отходов отраслей промышленности и энергосберегающие технологии. 1986. P. 145–146.
51. Тинников А.А., Хрулев В.М., Селиванов В.М. О возможности применения гидролизного лигнина в качестве органического мелкого заполнителя для изготовления легких бетонов // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. 1982. Vol. 7. P. 76–78.
52. Тинников А.А. Технология и свойства наполненного лигнином деревобетона на шлакощелочном вяжущем: Дис. канд. техн. наук. 1984. 167 p.
53. Глуховский В., Пахомов В.. Шлакощелочные цементы и бетоны. Киев: БудІвельник, 1978. P. 184.
54. Новые шлаковые цементы и их применение в строительстве. Ленинград: ВСНХ- СССР.СОЮЗСТРОЙ, 1931. P. 94.
55. Purdon A.O. The action of alkalis on blast-furnace slag // J. Soc. Chem. Ind. 1940. Vol. 59, № 9. P. 191–202.

56. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 5th ed. Institut Géopolymère, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 2008. Vol. 171. P. 680.
57. Emdadi Z. et al. Development of Green Geopolymer Using Agricultural and Industrial Waste Materials with High Water Absorbency // Appl. Sci. 2017. Vol. 7, № 5. P. 514.
58. Артамонова А.В., Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения замена и оптимизация компонентов мельниц и печей // Цемент и его применение. 2011. Vol. 4. P. 108–113.
59. Белов В., Курятников Ю., Новиченкова Т.. Технология и свойства современных цементов и бетонов: Учебное пособие. М.:Издательство АСВ, 2014. 280 p.
60. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов. Пенза:ПГУАС, 2014. 128 p.
61. Humad A.M., Habermehl-Cwirzen K., Cwirzen A. Effects of Fineness and Chemical Composition of Blast Furnace Slag on Properties of Alkali-Activated Binder // Materials (Basel). 2019. Vol. 12, № 20. P. 3447.
62. Kalashnikov V.I., Moroz M.N. High hydrophobic multicomponent low-slag fine-grained concretes // Sci. Her. Vor. State Univ. Archit. Civ. Eng. Constr. Archit. 2010. Vol. 1, № 17. P. 106–111.
63. Rakhimova N.R. Properties of alkali-activated slag cements Eigenschaften alkaliaktivierter Schlackenzemente // ZKG Int. 2012. Vol. 65, № 11. P. 32–42.
64. Talling B., Brandstetr J. Present state and future of alkali-activated slag concretes // In: 3rd International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Trondheim Norway, 1989. P. 1519–1546.
65. Wang S.-D., Scrivener K.L., Pratt P.L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag // Cem. Concr. Res. 1994. Vol. 24, № 6. P. 1033–1043.
66. Pan Z. et al. Hydration products of alkali-activated slag–red mud cementitious material // Cem. Concr. Res. 2002. Vol. 32, № 3. P. 357–362.

67. Brough A., Atkinson A. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars // *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, № 6. P. 865–879.
68. Кривенко П.. Специальные шлакощелочные цементы. Киев: Будівельник, 1992. 192 p.
69. Ватин Н.И. et al. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал.* 2011. Vol. 4. P. 16–21.
70. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – A review // *J. Mater. Res. Technol.* 2019. Vol. 8, № 1. P. 1522–1531.
71. Рахимова Н.Р. Шлакощелочные вяжущие и бетоны с силикатными и алюмосиликатными минеральными добавками. Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2010. 67 p.
72. Русина В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. 224 p.
73. Fernández-Jiménez A., Palomo A., Criado M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model // *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35, № 6. P. 1204–1209.
74. Katz A. Microscopic Study of Alkali-Activated Fly Ash // *Cem. Concr. Res.* 1998. Vol. 28, № 2. P. 197–208.
75. Kalashnikov V.I. et al. Effective clay-slag building materials using clay South-Bashmakovo field // *Mod. Tech. Technol.* 2015. Vol. 42, № 2. P. 12–16.
76. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Literature Review of Advances in Materials Used in Development of Alkali-Activated Mortars, Concretes, and Composites // *J. Mater. Civ. Eng.* 2019. Vol. 31, № 11. P. 03119002.
77. Kirschner A. V, Harmuth H. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials // *Ceram. - Silikaty.* 2004. Vol. 48. P. 117–120.
78. Barbosa V.C.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica:

- sodium polysialate polymers // *Int. J. Inorg. Mater.* 2000. Vol. 2. P. 309–317.
79. Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future // *Cem. Concr. Res.* 1999. Vol. 29, № 8. P. 1323–1329.
80. Criado M., Palomo A., Fernandezjimenez A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products // *Fuel.* 2005. Vol. 84, № 16. P. 2048–2054.
81. Кривенко П.В., Блажис А.Р., Ростовская Г.С. Супербыстротвердеющие высокопрочные щелочные клинкерные и бесклинкерные цементы // *Цемент.* Киев, 1993. Vol. 4. P. 27–30.
82. Калашников В.И. Новые геополимерные материалы из горных пород, активизированные малыми добавками шлака и щелочей // *Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения: Восьмые академические чтения РААСН.* Самара: Изд-во Самарского гос. архит.-строит. ун-та, 2004. P. 205–209.
83. Рахимов Р.З., Хабибуллина Н.Р. Достижения, проблемы и перспективные направления развития исследований производства шлакощелочных вяжущих и бетонов // *Достижения, проблемы и направления развития теории и практики строительного материаловедения: сб. докл. X Академических чтений РААСН.* Пенза-Казань, 2006. P. 57–59.
84. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator // *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35, № 10. P. 1984–1992.
85. Bakharev T., Sanjayan J.G., Cheng Y.-B. Alkali activation of Australian slag cements // *Cem. Concr. Res.* 1999. Vol. 29, № 1. P. 113–120.
86. CRIADO M., PALOMO A., FERNANDEZJIMENEZ A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products // *Fuel.* 2005. Vol. 84, № 16. P. 2048–2054.
87. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements // *Fuel.* 2003. Vol. 82, № 18. P. 2259–2265.
88. Thomas R. et al. Alkali-Activated Slag Cement Concrete: A closer look at a

- sustainable alternative to portland cement // *Concr. Int.* 2016. Vol. 38, № 1. P. 33–38.
89. van Jaarsveld J., van Deventer J.S.J. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers // *Ind. \& Eng. Chem. Res.* 1999. Vol. 38. P. 3932–3941.
90. Song K.-I. et al. Carbonation Characteristics of Alkali-Activated Blast-Furnace Slag Mortar // *Adv. Mater. Sci. Eng.* / ed. Li B. Hindawi Publishing Corporation, 2014. Vol. 2014. P. 1–11.
91. You N. et al. The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar // *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 227. P. 116614.
92. Nedeljković M., Li Z., Ye G. Setting, Strength, and Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Fly Ash and Slag Pastes: Effect of Slag Content // *Materials (Basel)*. 2018. Vol. 11, № 11. P. 2121.
93. Krizan D., Zivanovic B. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali–slag cements // *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, № 8. P. 1181–1188.
94. Константинов В., Пужанов Г.. Высокопрочные быстрот-вердеющие вяжущие материалы на основе гранулированных доменных шлаков и растворимого стекла // *Строительные материалы*. 1960. Vol. 8. P. 33–35.
95. Константинов В., Пужанов Г.. Высокопрочные быстрот-вердеющие шлакосиликатные бетоны для сборных железобетонных конструкций // *Бетон и железобетон*. 1960. Vol. 10. P. 14–17.
96. Уткин В.И. Бетоны на основе стеклошлакового вяжущего // *Известия Молдавского филиала АН СССР*. 1961. Vol. 16, № 84.
97. Уткин В.И. Стеклошлаковое вяжущее // *Материалы координационного совещания по вопросам развития производства и применения жидкого стекла в строительстве*. 1962. P. 78–81.
98. Сухоруков С.А. Бетоны на жидком стекле. Вопросы технологии, прочности и деформативности: Автор, дис. канд. техн. наук. 1962. 23 p.
99. Климанова Е.А. Жидкое стекло. К.: Госстройиздат УССР, 1959. 180 p.

100. Климанова Е., Гужавина Е.Т. О механизме твердения стеклошлаковых материалов // Наука и техника в городском хозяйстве. 1967. Р. 120–127.
101. Глуховский В.Д. Производство бетонов и конструкций на основе шлакощелочных вяжущих. Киев: Будівельник, 1988. 144 р.
102. Глуховский В.Д. Использование отходов в производстве шлакощелочных бетонов // Республиканская конференция по проблемам комплексного использования в народном хозяйстве республики отходов горнообогатительных, коксо-химических и металлургических предприятий: материалы конф. Киев: СОПС АН УССР, 1972. Р. 109.
103. Кривенко П.В., Гелевера А.Г. Быстротвердеющие шлакощелочные цементы // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции: Тез. докл. II Всесоюз. науч.-практ. конф. К., 1984. Р. 39–41.
104. Кривенко П.В., Гелевера А. Гидратация и структурообразование шлакощелочных цементов в присутствии кристаллических интенсификаторов твердения // Гидратация и структурообразование цементов, полученных на основе отходов промышленности. Тез. докл. совещ. Чимкент, 1983. Р. 21–23.
105. Кривенко П.В., Пушкарева Е.К., Маляренко, В.В. Петропавловский О.Н. Гидратация и дегидратация шлакощелочных материалов на основе марганецсодержащих шлаков // Цемент. 1989. Vol. 10. Р. 8–14.
106. Рунова Р.Ф. Исследование автоклавных щелочно-щелочноземельных алюмосиликатных материалов: Автор, дис. канд. техн. наук. 1972. 22 р.
107. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 2008. Vol. 171.
108. Izquierdo M. et al. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 166, № 1. Р. 561–566.
109. Davidovits J. Properties of Geopolymer Cements // SRIBM, Kiev. 1994. Vol. 1. Р. 131–149.
110. Davidovits J. Ancient and modern concretes: what is the real difference // Concr. Int. 1987. Vol. 9. Р. 12–23.
111. Lee W.K.W., van Deventer J.S.J. The effect of ionic contaminants on the early-

- age properties of alkali-activated fly ash-based cements // *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, № 4. P. 577–584.
112. Xu H., van Deventer J.S.J. The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars // *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2003. Vol. 216, № 1–3. P. 27–44.
113. Stade H. On the reaction of C-S-H(di, poly) with alkali hydroxides // *Cem. Concr. Res.* 1989. Vol. 19, № 5. P. 802–810.
114. Hong S.-Y., Glasser F.P. Alkali binding in cement pastes // *Cem. Concr. Res.* 1999. Vol. 29, № 12. P. 1893–1903.
115. Shi C., Wu X., Tang M. Hydration of alkali-slag cements at 150°C // *Cem. Concr. Res.* 1991. Vol. 21, № 1. P. 91–100.
116. Krivenko P. et al. Fly Ash Based Geocements: Genesis of Microstructure and Properties at Hydration-Dehydration Process // *Brittle Matrix Composites 8*. Elsevier, 2006. P. 55–64.
117. Pan Z. et al. Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud–slag cementitious material // *Cem. Concr. Res.* 2003. Vol. 33, № 9. P. 1437–1441.
118. Hong S.-Y., Glasser F.. Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels // *Cem. Concr. Res.* 2002. Vol. 32, № 7. P. 1101–1111.
119. Macphee D.E. et al. Solubility and Aging of Calcium Silicate Hydrates in Alkaline Solutions at 25°C // *J. Am. Ceram. Soc.* 1989. Vol. 72, № 4. P. 646–654.
120. Escalante-García J. et al. Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkali-activated slag cement mortars // *Cem. Concr. Res.* 2003. Vol. 33, № 10. P. 1567–1574.
121. Song S. et al. Hydration of Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag // *J. Mater. Sci.* 2000. Vol. 35. P. 249–257.
122. Puertas F., Fernández-Jiménez A. Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes // *Cem. Concr. Compos.* 2003. Vol. 25, № 3. P. 287–292.
123. Jiang J. et al. Study on the preparation and properties of high-porosity foamed

- concretes based on ordinary Portland cement // Mater. Des. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 92. P. 949–959.
124. Комар А.Г., Величко Е., Белякова Ж.С. О некоторых аспектах управления структурообразованием и свойствами шлакосиликатного пенобетона // Строительные материалы. 2001. Vol. 7, № 095. P. 12–16.
125. Лаукайтис А.А. Прогнозирование некоторых свойств ячеистого бетона низкой плотности // Строительные материалы. 2001. Vol. 4. P. 27–29.
126. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. Теория и практика. М.:Издательство ассоциации строительных вузов, 2010. 248 p.
127. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete; A review // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2015. Vol. 101, № December. P. 990–1005.
128. Nambiar E.K.K., Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete // Cem. Concr. Res. 2007. Vol. 37, № 2. P. 221–230.
129. Sun S.-B. et al. Effects of activator on the preparation and properties of foam cement // Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal Wuhan Univ. Technol. 2012. Vol. 34. P. 22–25.
130. Шахова Л. Некоторые аспекты исследований структурообразования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения // Строительные материалы. 2003. Vol. 2. P. 4–7.
131. Леви Ж.П. Легкие бетоны. Приготовление — свойства — применение. М.: Гостройиздат, 1955. 146 p.
132. Клейтон В. Эмульсии, их теория и техника применения. М.: Издательство ИЛ, 1950. 643 p.
133. Классен В.И., Мокроусов В.А. Введение в теорию флотации. М.:Металлургиздат, 1953. 464 p.
134. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.:, 1979. 568 p.
135. Тихомиров В.. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.:Химия, 1975. 264 p.
136. Дерягин Б.В. К вопросу об определении понятия и величины

- расклинивающего давления и его роли в статике и кинетике тонких слоёв жидкостей // Коллоидный журнал. 1955. Vol. 17. P. 207–215.
137. Канн К.. Физические исследования вытекания жидкости из пен: дисс. ... канд. физ-мат.наук. Институт теплофизики, Новосибирск, 1979. 163 p.
138. Кругляков П., Ексерова Д.. Пены и пенные пленки. М.:Химия, 1990. 432 p.
139. Roslan A.F., Awang H., Mydin M.A.O. Effects of Various Additives on Drying Shrinkage, Compressive and Flexural Strength of Lightweight Foamed Concrete (LFC) // Adv. Mater. Res. 2012. Vol. 626. P. 594–604.
140. Ребиндер П.. Физико-химические основы производства пенобетонов // Изв.АН СССР. 1937. Vol. 4. P. 362–370.
141. Kadela M., Kukielka A., Małek M. Characteristics of Lightweight Concrete Based on a Synthetic Polymer Foaming Agent // Materials (Basel). 2020. Vol. 13, № 21. P. 4979.
142. Feng J. et al. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity // Mater. Des. 2015. Vol. 65. P. 529–533.
143. Kielè A. et al. Wood shavings and alkali-activated slag bio-composite // Eur. J. Wood Wood Prod. Springer Berlin Heidelberg, 2020. Vol. 78, № 3. P. 513–522.
144. Дворников Р., Самченко С.. Формирования ячеистой структуры поризованного арболита // Техника и технология силикатов. 2022. Vol. 29, № 1. P. 82–91.
145. Дворников Р., Величко Е.. Пути повышения качества высокоэффективного арболитобетона на основе отходов промышленности // Вторая национальная конференция «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования». Москва, 2021. P. 309–312.
146. Dvornikov R.M., Samchenko S.V. Study of the contact zone of slag silicate porous composite with wood chips in wood chip concrete materials // Zemleustrìj, kadastr i monitoring zemel'. 2022. Vol. 29, № 2. P. 157–167.
147. Воронов В.. Пенобетоны на основе композиционных вяжущих: дис. ...канд. тех. наук:05.23.05/Воронов Василий Васильевич. БГТУ им. В.Г. Шухова - Белгород, 2020. 195 p.

148. Комар А.Г., Величко Е., Белякова Ж.С. О некоторых аспектах управления структурообразованием и свойствами шлакосиликатного пенобетона // Строительные материалы. 2001. Vol. 559, № 095. P. 12–16.
149. Баженов Ю.М. Способы определения состава бетона различных видов. Москва: Стройздат, 1975. 268 р.
150. Баженов Ю.М. Технология Бетона: Учеб. Пособие Для Технол. Спец. Строит. Вузов. 1987. P. 415.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт опытно-промышленного опробования результатов
диссертационной работы**

УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента
технического развития

ООО «Мечел-Материалы»

И.С. Малышев



«25» 05 2022

АКТ

Об использовании результатов диссертационной работы
Дворникова Руслана Михайловича на тему
«Высокоэффективный поризованный арболит
на основе шлакосиликатных вяжущих веществ»

Специалисты ООО «Мечел-Материалы» департамента технического развития исследовательско-технологического отдела в составе начальника – А.В. Лоран, инженера-технолога – И.М. Иванова и отдела по контролю качества, в составе начальника – Л.В. Алёшкиной, на заседании технического совещания по вопросам внедрения новых эффективных технологий производства строительных материалов рассмотрели результаты диссертационной работы Р.М. Дворникова, для определения возможности их использования в продукции, выпускаемой предприятием ООО «Мечел-Материалы».

Диссертантом разработана композиция на основе тонкомолотого доменного гранулированного шлака, древесной щепы хвойных пород, натриевого жидкого стекла и технической пены. Готовый материал имеет следующие характеристики: средняя плотность 600–700 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,081 Вт/(м°С), прочность при сжатии не менее 1,9 МПа.

Разработанный композиционный материал может применяться в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений индивидуального жилищного строительства, а также в качестве самонесущих стен и перегородок. Данный материал может быть использован как альтернатива пено- и газобетонам, а также изделиям из арболита неавтоклавного твердения изготовленных на основании требований ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия», а также ГОСТ 19222–2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

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. Необходимо отметить, что технология производства поризованного арболита с использованием вяжущего на основе портландцемента уже находит свое применение в строительной отрасли. Поэтому производство нового композиционного материала имеет базовую подоснову.

На основании вышеизложенного предприятие ООО «Мечел-Материалы» заключает, что материалы диссертационной работы Р.М. Дворникова могут быть использованы по целевому назначению на предприятии.

Начальник
исследовательско-технологического отдела
департамента технического развития
ООО «Мечел-Материалы»



Лоран
Алевтина
Валентиновна

Инженер-технолог
исследовательско-технологического отдела
департамента технического развития
ООО «Мечел-Материалы»



Иванов
Илья
Михайлович

Начальник
отдела по контролю качества
департамента технического развития
ООО «Мечел-Материалы»



Алёшкина
Людмила
Владимировна

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Рекомендации по изготовлению поризованного арболитового материала и применению его в строительстве

1. Общие положения.

1.1. Рекомендации распространяются на технологию изготовления смеси для получения шлакосиликатного поризованного арболита на основе доменного гранулированного шлака, натриевого жидкого стекла, щепы хвойных пород древесины и технической пены с оптимальными параметрами качества.

1.2. Рекомендации содержат требования к исходным материалам, составам смеси и получению шлакосиликатного поризованного арболита.

2. Исходные материалы.

2.1. В качестве щелочного активизатора рекомендуется использовать натриевое жидкое стекло, имеющее силикатный модуль $n = 1,9 - 2,1$ и плотность $1,25 - 1,35$ г/см³.

2.2. В качестве вяжущего компонента рекомендуется использовать доменный гранулированный шлак с дисперсностью не менее 500 м²/кг и содержанием аморфной фазы не менее 85%.

2.3. В качестве заполнителя рекомендуется использовать щепу из хвойных пород древесины (в соответствии с ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия», с насыпной плотностью не менее 120 кг/м³ и влажностью не более 12%.

2.4. В качестве пенообразующего компонента рекомендуется использовать синтетический пенообразователь со следующими свойствами: РН (водородный показатель продукта) равен $8,0-10,5$; плотность при 20°C составляет от 1040 до 1100 кг/м³.

2.5. В качестве стабилизатора пены применялась бентонитовая глина с долей монтмориллонита не менее 85% на основании ТУ 2164-005-49215611-2007.

2.6. Жидкие и твердые компоненты следует хранить отдельно в сухом и закрытом помещении.

3. Составы смесей.

3.1. Для изготовления сырьевой смеси для шлакосиликатного поризованного арболита необходимо соблюдать следующее соотношение компонентов:

№	Компонент	Содержание компонентов, %	
		Не менее	Не более
1.	Жидкое стекло	30	32
2.	Доменный шлак	43	47
3.	Древесная щепа	13	19
4.	Техническая пена	7	9

- 3.2. Сумма компонентов составляет 100 масс, %.
- 3.3. Оптимальная концентрация раствора синтетического пенообразователя составляет 3,3%.
- 3.4. Оптимальное количество стабилизатора пены, бентонитовой глины составляет 4,0% от массы раствора.
4. Процесс приготовления и укладки смеси.
 - 4.1. Смесь изготавливается из сухого и жидкого компонентов путем перемешивания вручную или с помощью пенобетоносмесителя.
 - 4.2. Температура исходных компонентов должна быть в пределах 20...25° С.
 - 4.3. Отдельно готовят сырьевую смесь из твердых компонентов, а именно доменного гранулированного шлака и древесной щепы.
 - 4.4. Техническую пену необходимой плотности и кратности готовят отдельно с помощью парогенератора или вручную с помощью строительного миксера.
 - 4.5. Полученную сухую смесь перемешивают с жидким стеклом указанной плотности и технической пеной до однородного состояния.
 - 4.6. Перемешивание компонентов может осуществляться в любых смесителях принудительного действия (600-800 об/мин.). Небольшое количество смеси можно смешать с помощью дрели с установленной на нее мешалкой.
 - 4.7. Полученную смесь заливают в подготовленную опалубку. При использовании съемной опалубки ее внутренние поверхности должны быть защищены от контакта со смесью путем прокладки полимерной пленки в качестве антиадгезионного материала для металлических форм. При использовании несъемной опалубки, в качестве которой может быть использована наружная оболочка многослойной трубы, прокладка не требуется.
 - 4.8. Для улучшения физико-механических показателей материала, а также для уменьшения сроков твердения, готовую продукцию можно подвергать тепло влажностной обработке (ТВО) при температуре 90°С в течение 8 часов.
5. Меры безопасности при проведении работ.
 - 5.1. К работе с материалом допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при работе с химическими веществами. Не следует допускать к работе лиц с повреждениями кожного покрова, с поражением век и глаз.
 - 5.2. При монолитной заливке обязательное соблюдение мер личной гигиены и применение пылезащитной спецодежды, спецобуви, теплозащитных фартуков, защитных очков и резиновых перчаток.
 - 5.3. При попадании смеси на тело и одежду место попадания необходимо промыть водой с мылом.
 - 5.4. На всех участках территории строительной площадки, связанных с приготовлением смеси курение запрещается.

5.5. Основными средствами пожаротушения являются песок, асбестовые одеяла, огнетушители.

Разработано:

Академик РИА,
Доктор технических наук,
профессор



Самченко Светлана Васильевна

инженер



Дворников Руслан Михайлович

Утверждено:

Руководитель секции
Доктор технических наук



Бурьянов Александр Федорович

Секретарь секции
Кандидат технических наук



Гальцева Надежда Алексеевна