

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. М.К. АММОСОВА»**

**На правах рукописи**



**ФЁДОРОВ АРТЁМ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ЛЕГКИЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА**

**Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент  
Попов А. Л.**

**Якутск – 2026**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА</b> .....	12
1.1 История создания и развития технологии получения легких бетонов .....	16
1.2 Компоненты для получения легких бетонов на пористом заполнителе.....	27
1.3 Эффективность использования цементных композиционных вяжущих .....	33
1.4 Способы формирования микроструктуры легких бетонов.....	37
1.5 Выводы по главе 1.....	41
<b>2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	43
2.1 Методы исследований .....	43
2.2 Применяемые материалы .....	52
2.3 Выводы по главе 2.....	57
<b>3 ОЦЕНКА ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА КАК КОМПОНЕНТА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ</b> .....	58
3.1 Дизайн проведения исследования .....	58
3.2 Изучение качества природного цеолита как компонента композиционного вяжущего .....	64
3.3 Изучение влияния добавки природного цеолита на морозостойкость цементного камня.....	74
3.4 Разработка состава композиционного вяжущего с применением природного цеолита .....	85
3.5 Влияние композиционного вяжущего с применением природного цеолита на структурообразование цементного камня.....	92
3.6 Выводы по главе 3.....	102
<b>4 РАЗРАБОТКА ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ И КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ</b> .....	105

4.1 Свойства и структурные особенности пористых заполнителей .....	106
4.2 Оценка свойств золошлаковых отходов в качестве добавки для легкого бетона .....	113
4.3 Выбор и оценка основных свойств пенообразователей.....	119
4.4 Физико-механические и теплотехнические характеристики легкого бетона на пористом заполнителе в зависимости от состава.....	126
4.5 Микроструктура синтезированной пористости легкого бетона на крупном пористом заполнителе.....	138
4.6 Выводы по главе 4.....	143
<b>5 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕГКОГО БЕТОНА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА .....</b>	<b>146</b>
5.1 Теоретическая оценка тепловой эффективности стеновых ограждений с применением легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита .....	146
5.2 Разработка технологии производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита и пористого заполнителя .....	164
5.3 Технико-экономическая эффективность производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита .....	169
5.4 Внедрение результатов работы.....	172
5.5 Выводы по главе 5.....	173
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>175</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>178</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>213</b>
Приложение А. Титульный лист стандарта организации №02069705- 83001-2025.....	214

Приложение Б. Титульный лист технологического регламента на производство стеновых блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита.....	215
Приложение В. Акт выпуска опытно-промышленной партии .....	216
Приложение Г. Справка о внедрении результатов в учебный процесс.....	217

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Согласно Указу Президента о Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года одним из основных направлений реализации настоящей стратегии в Республике Саха (Якутия) является организация производства строительных материалов на базе действующих месторождений строительных материалов. Производство качественных ячеистых легких бетонов характеризуется высоким расходом портландцемента для требуемых прочностей, а также сложной и дорогостоящей технологией изготовления с использованием специализированного оборудования. В тоже время, в регионе развивается технология получения пеноцеолита – пористого заполнителя на основе местного сырья в виде природного цеолита. Анализ опыта реализации данной технологии, а также существующих способов повышения эффективности производства легкого бетона показал перспективность задачи усовершенствования данной технологии, которая может быть решена путем: снижения расхода портландцемента с сохранением физико-механических характеристик за счет применения композиционных вяжущих (КВ) со сниженной клинкерной составляющей и получения рациональной поризованной структуры композита за счет вариации параметров, оказывающих существенное влияние на плотность.

Работа выполнялась в рамках гранта программы «УМНИК-2021» Фонда содействия инновациям (Договор №17895ГУ/2022 от 20.05.2022 г.), государственных контрактов № 8319, 7633 с Академией наук РС(Я) и программы деятельности НОЦ «Север» по направлению «Технологии хозяйственной деятельности в криолитозоне и новые материалы».

**Степень разработанности темы.** Классические технологии производства легкого бетона на основе керамзита (как пористого заполнителя) и портландцемента являются распространенными, нашли свою нишу на строительном рынке и хорошо освещены в научных трудах отечественных и

зарубежных ученых. Для технологии конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористых заполнителях наблюдается недостаток в прикладных исследованиях, направленных на повышение их прочности и морозостойкости. К открытым вопросам относятся: эффективность использования композиционных вяжущих для получения легкого бетона на пористом заполнителе с повышенными эксплуатационными характеристиками для применения в суровых природно-климатических условиях.

**Цель и задачи работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с применением природного цеолита.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

– обоснование возможности использования природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве компонента композиционного вяжущего и разработка его рецептуры со сниженной клинкерной составляющей, обеспечивающей характеристики сопоставимые с исходным цементным камнем;

– изучение особенностей механизма структурообразования, физико-механических характеристик, фазового состава цементной системы с использованием природного цеолита; разработка состава КВ – тонкомолотого цемента (ТМЦ);

– изучение свойств пористого заполнителя (пеноцеолита) и золошлакового отхода (ЗШО) в виде микрозаполнителя для их применения в составе легких бетонов;

– выбор наиболее эффективного пенообразователя для поризации бетонной смеси;

– изучение влияния рецептурно-технологических факторов на структурообразование ячеистобетонной смеси, физико-механические и эксплуатационные характеристики легкого бетона (пеноцеолитбетона);

– разработка и изучение свойств конструкционно-теплоизоляционного

легкого бетона на основе пористого заполнителя, композиционного вяжущего с применением природного цеолита, а также комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности цементной матрицы;

– подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Апробация работы.

**Научная новизна работы.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе – пеноцеолите, заключающееся в: замене цемента композиционным вяжущим с использованием природного цеолита (ТМЦ–85); поризации цементной матрицы введением пенообразователя; снижении плотности бетона за счет использования в качестве микрозаполнителя золошлакового отхода. Формирование рациональной плотности растворной части легкого бетона в сочетании с КВ обеспечивают повышение пористости и снижение теплопроводности при повышении прочности и марки морозостойкости пеноцеолитбетона.

Установлен характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня с его использованием. За счет пуццолановой активности цеолита в составе КВ: происходит более полное протекание процессов структуро- и фазообразования, способствующих повышению содержания идиоморфных кристаллов новообразованных гидросиликатов различной основности и уплотнению микроструктуры цементного камня; сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения соответствующего исходному портландцементу; повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %. Факторами качества природного цеолита, определяющими эффективность его использования как кремнеземного компонента КВ, высокую активность по отношению к СаО и коэффициент качества ( $K_K=1,16$ ), являются: полиминеральный состав; высокая пористость; высокая размолоспособность и полифракционный состав

получаемого порошка; способность обеспечивать процесс гидратации цементного камня даже после циклов замораживания и оттаивания.

Предложен механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ–85, пенецеолита и комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности растворной части – пенообразователя и золошлакового отхода. За счет разного уровня дисперсности пор, обеспечиваемого высокой концентрацией пенецеолита, поризацией цементной матрицы пенообразователем и наличием золошлакового отхода, создается объемная плотноупакованная пористая структура бетона. Развитая морфология поверхности пуццоланово-активных заполнителей (пенецеолита и ЗШО) служит подложкой для кристаллизации продуктов гидратации. Рациональная плотность растворной части в совокупности с прочной контактной зоной цементного камня с заполнителями, способствуют повышению прочности пенецеолитбетона.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе с использованием природного цеолита и комплекса добавок – пенообразователя и золошлаковых отходов для обеспечения рациональной плотности растворной части пенецеолитбетона. Установлены закономерности влияния состава бетонной смеси легкого бетона на физико-механические свойства.

Установлен рациональный состав композиционного вяжущего с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве активного компонента – ТМЦ–85, характеризующегося  $S_{уд} \sim 520 \text{ м}^2/\text{кг}$  и активностью 37,9 МПа.

Установлен рациональный уровень концентрации пористого заполнителя ( $\varphi = 0,59$ ) в составе бетонной смеси для достижения максимальной прочности легкого бетона ( $R_{сж} = 6,5 \text{ МПа}$ ) при заданной плотности (D900).

Разработаны составы и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пеноцеолитбетона, на основе пористого заполнителя, КВ ТМЦ–85, золошлакового наполнителя с использованием пенообразователя Rospena, позволяющие получить изделия с маркой по плотности D900, классом по прочности до B5,0 и маркой по морозостойкости F<sub>1</sub>100.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы являлись результаты исследования отечественных и зарубежных исследователей в области строительного материаловедения, а также комплексный анализ результатов, объединённых в системе «состав (сырьё) – структура (сырьё, материал) – свойства (материал)». Свойства сырьевых материалов и разработанных составов легкого бетона определяли с помощью базовых методов исследований в соответствии с действующими нормативными документами, модельных экспериментов и комплекса современных физико-химических методов анализа: лазерной гранулометрии, растровой электронной микроскопии, РФА, ДТА и др.

**Положения, выносимые на защиту:**

- обоснованное и экспериментально подтвержденное технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе;
- характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня на его основе;
- механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ–85, пористого заполнителя, пенообразователя и золошлакового отхода;
- состав композиционного вяжущего с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в качестве активного компонента;
- состав и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пеноцеолитбетона, на основе пеноцеолита и ТМЦ–85. Апробация результатов работы.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается использованием широкого спектра регламентированных методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования с выполнением многократных измерений для необходимого уровня точности и сходимости теоретических и экспериментальных исследований; апробацией результатов в промышленных условиях; получением результатов, непротиворечащих классическим положениям строительного материаловедения, а также работам других авторов.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах: «Эрэл-2021» (Якутск, 2021); «Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера» (Якутск, 2021); «Научные достижения 2022: естественные, точные и технические науки» (Москва, 2022); XXIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Якутск, 2023); XI Евразийский симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур «EURASTRENCOLD-2023» (Якутск, 2023); X Международная конф. по математическому моделированию, посвященная 30-летию академии наук Республики Саха (Якутия) (Якутск, 2023); «Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (ТЭГУА-2023)» (Якутск, 2023), «Строительное материаловедение: настоящее и будущее» (Москва, 2023) и др.

**Внедрение результатов исследований.** Промышленная апробация производства и применения разработанных составов легких бетонов проводилась на базе ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар). С целью внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативно-технические документы:

– СТО 02069705-83001-2025 «Легкий бетон на композиционном вяжущем с применением природного цеолита»;

– технологический регламент на производство стеновых блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 «Строительство» и магистров – 08.04.01 «Строительство».

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 12 публикациях, в том числе: 3 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Получен патент РФ на изобретение.

**Личный вклад.** Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования природного цеолита месторождения Хонгуруу Республики Саха (Якутия) в качестве компонента композиционного вяжущего, а также возможность получения конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе легкого заполнителя с применением разработанного КВ, золошлакового наполнителя и пенообразователя. Проведен комплекс экспериментальных исследований с последующей обработкой результатов, проведена апробация результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 217 страницах машинописного текста, включающего 60 таблиц, 66 рисунков, список литературы из 278 источников, 4 приложений.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В условиях, характеризующихся суровыми природно-климатическими условиями, благодаря сочетанию в себе теплоизоляционных и прочностных свойств популярностью пользуются легкие бетоны, основным компонентом для производства которых является портландцемент. Однако в условиях Арктики изготовление изделий из легкого бетона характеризуется высокими материальными затратами на доставку его основных компонентов, такие как пористые заполнители. Так для производства керамзитобетона основной его компонент привозится с «материка» - керамзит, который при перевозке занимает большие объемы, обуславливая высокие транспортные расходы. При этом в некоторых регионах суровые природно-климатическими условия могут сочетаться с высокой рассредоточенностью населенных пунктов относительно главных логистических центров региона, а также коротким летним «окном» навигационного периода Северного завоза, что повышают стоимость цемента и, следовательно, строительных материалов с его использованием.

В Республике Саха (Якутия) реализуется проект социально-экономического развития региона до 2032 года, направленный на внедрение современных технологий для организации производств инновационных продуктов. Одной из ключевых стратегических целей проекта является расширение применения минеральных строительных материалов, способствующих увеличению срока службы строящихся объектов, а также освоения альтернативных сырьевых ресурсов.

Так, в период с 2025-2032 года планируется решить ряд задач, направленных на повышение уровня технологии производства сухих строительных смесей, разработку месторождения цеолитов Хонгуруу, организацию выпуска пористых заполнителей на основе цеолитового сырья. Также рассматривается задача по использованию золошлаковых отходов для применения в производстве строительных материалов. В этой связи для региона актуальна задача по разработке технологий производства строительных

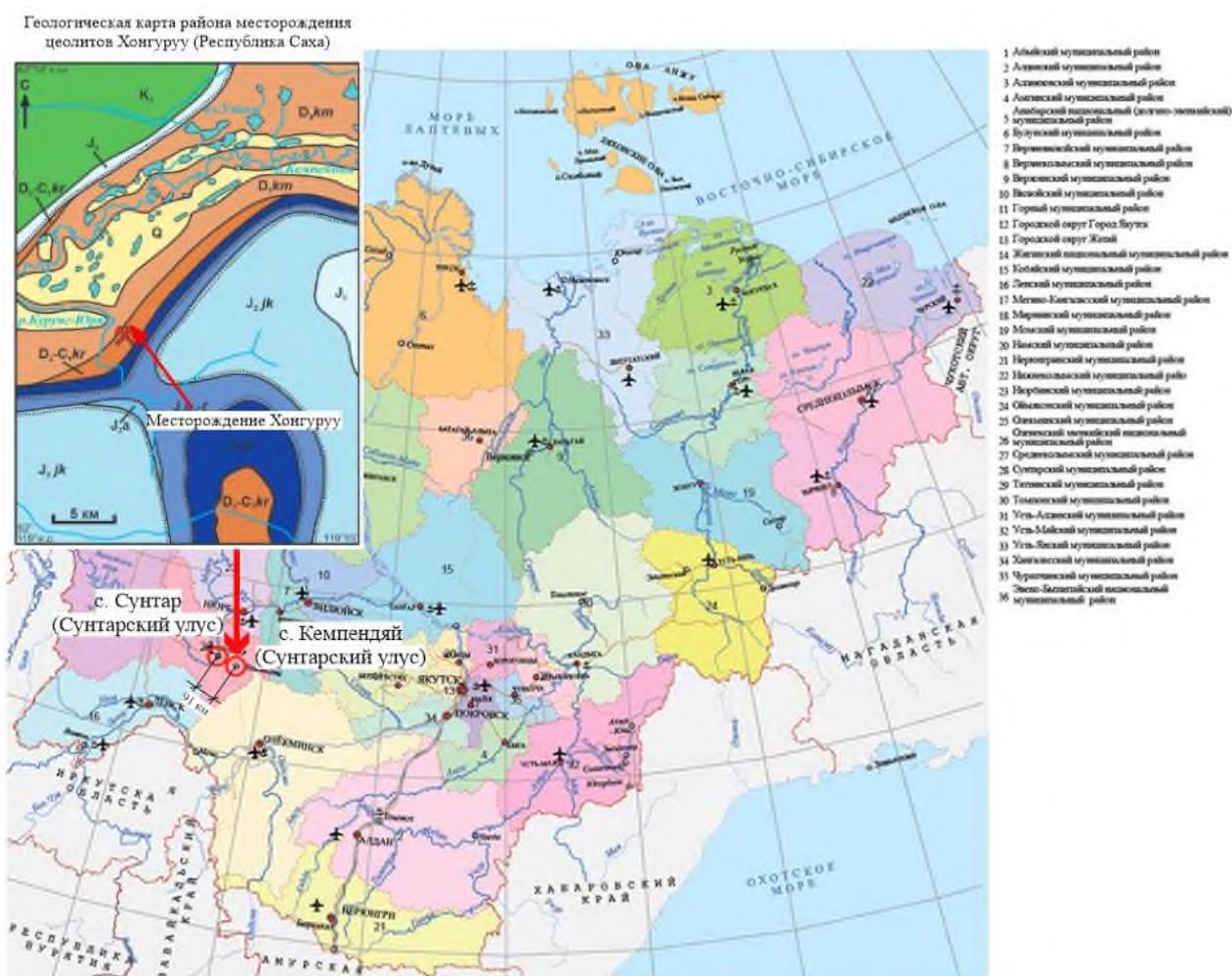
материалов, обеспечивающих повышенные требования по теплоизоляции зданий и сооружений на основе местного сырья и одновременно с экономным расходом портландцемента.

В последние годы разработаны эффективные заполнители для легких бетонов, которые открывают новые возможности улучшения всего комплекса свойств легких бетонов и конструкций из них. К перспективным пористым заполнителям с частично или полностью аморфизированной структурой зерна относятся: гранулированное пеностекло, гранулированная пеностеклокерамика и другие аналогичные заполнители с закрытой ячеистой структурой.

Наряду с этим в Якутии развивается технология производства пористого заполнителя для легкого бетона - пеноцеолита на основе природного цеолита Хонгуриинского месторождения, учтенный запас которых составляет 11,3 млн.т. По данным [1] ежегодная добыча цеолитовой породы составляет 30 – 50 тыс.т. (Рисунок 1.1). Месторождение цеолитов, включающее в себя четыре гряды, находится в местности Хонгуруу, в 92 километрах от улусного центра. Было открыто коллективом якутских геологов под руководством Кима Егоровича Колодезникова в 1978 году. Сегодня можно говорить о большом потенциале реализации в Якутии строительных материалов, применяющих в своей основе цеолиты месторождения Хонгуруу в виду обеспечения конкурентноспособных позиций на рынке за счет возможности минимизации издержек на транспортную логистику (Таблица 1.1).

Получение пеноцеолита на основе природного цеолита месторождения Хонгуруу производится по одноступенчатой технологии: *«сушка исходного сырья»* - *«дробление высушенных образцов»* - *«помол высушенных образцов»* - *«смешение с NaOH»* - *«окатывание полученной массы до гранул»* - *«сушка и вспенивание при температуре 720-780°C»* [2]. Как отмечает [3], легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны (ЛКТБ) должны быть одной из составляющих ограждающих конструкций благодаря своим расширенным прочностным и теплофизическим показателям. Так автором [4] были проведены первые исследования по созданию легких бетонов на пеноцеолите D500...600 с

полученными классами прочности на сжатие В1,5...В2, что характерно для ячеистых бетонов автоклавного твердения. В статье [5] зафиксирован коэффициент теплопроводности легкого бетона на пористом заполнителе из пенецеолита на природном песке В5 с плотностью D1000, равный 0,3 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).



**Рисунок 1.1** – Карта расположения цеолитового месторождения Хонгуруу в с. Кемпендяй Сунтарского улуса РС(Я) [1]

В связи с этим для регионов Крайнего Севера возрастает актуальность разработки научно-обоснованного решения для создания современных строительных материалов на композиционных вяжущих на основе местного сырья. Однако, опыт производства легкого бетона выявил ряд проблем, связанных с необходимостью корректировки поризованной структуры, низкими прочностными и теплозащитными показателями и высоким расходом цемента.

**Таблица 1.1 – Удаленность административных центров Республики Саха (Якутия) от месторождения Хонгуруу**

№	Улус (район)	Административный центр	Расстояние по прямой траектории от с. Кемпендяй, км
1	Абыйский улус	пгт. Белая Гора	1454
2	Алданский улус	г. Алдан	531
3	Аллаиховский улус	пгт. Чокурдах	1592
4	Амгинский улус	с. Амга	717
5	Анабарский национальный (долгано-эвенкийский) улус	с. Саскылах	1119
6	Булунский улус	пгт. Тикси	1153
7	Верхневиллюйский улус	с. Верхневиллюйск	179
8	Верхнеколымский улус	пгт. Зырянка	1608
9	Верхоянский улус	пгт. Батагай	977
10	Виллюйский улус	г. Виллюйск	243
11	Горный улус	с. Бердигестях	419
12	Жиганский национальный эвенкийский улус	с. Жиганск	572
13	Кобяйский улус	пгт. Сангар	492
14	Ленский район	г. Ленск	247
15	Мегино-Кангаласский улус	пгт. Нижний Бестях	587
16	Мирнинский район	г. Мирный	247
17	Момский район Муома улууһа	с. Хонуу	1274
18	Намский улус	с. Намцы	572
19	Нерюнгринский район	г. Нерюнгри	688
20	Нижнеколымский улус	пгт. Черский	2061
21	Нюрбинский улус	г. Нюрба	139
22	Оймяконский улус	пгт. Усть-Нера	1251
23	Оленёкский национальный эвенкийский улус	с. Оленёк	774
24	Олёкминский улус	г. Олёкминск	880
25	Среднеколымский улус	г. Среднеколымск	1741
26	Таттинский улус	с. Ытык-Кюель	772
27	Томпонский район	пгт. Хандыга	872
28	Усть-Алданский улус	с. Борогонцы	648
29	Усть-Майский улус	пгт. Усть-Мая	863
30	Усть-Янский улус	пгт. Депутатский	1256
31	Хангаласский улус	г. Покровск	554
32	Чурапчинский улус	с. Чурапча	718
33	Эвено-Бытантайский национальный улус	с. Батагай-Алыта	844

### **1.1. История создания и развития технологии получения легких бетонов**

А.Н. Давидюк в своей работе [3] пишет: «важной эксплуатационной характеристикой легких бетонов является их комплекс теплозащитных свойств». Легкие бетоны, согласно ГОСТ 25820-2021 «Бетоны легкие. Технические условия», подразделяются между собой на теплоизоляционные, конструкционно-теплоизоляционные и конструкционные. Структура легкого бетона определяется широкой номенклатурой используемых компонентов, а также различной технологией изготовления.

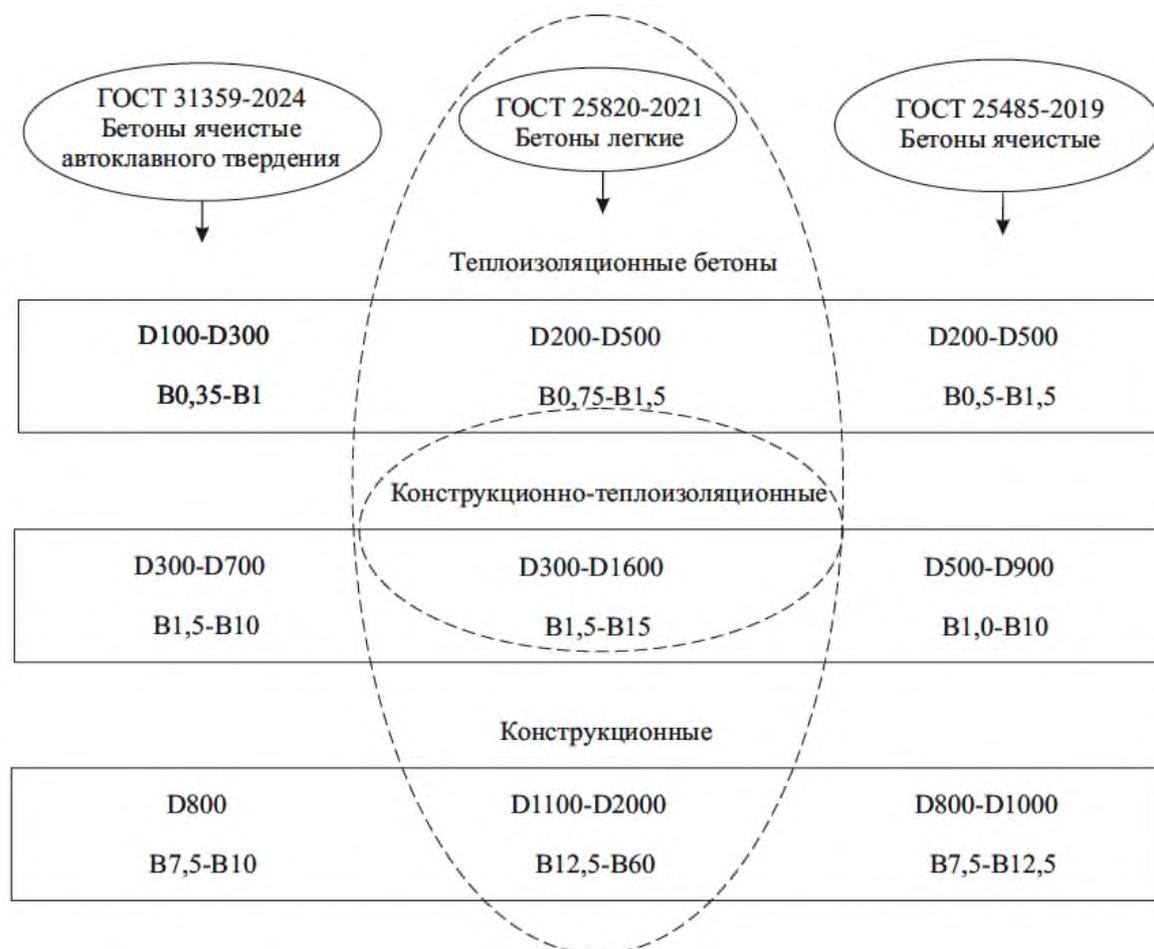
Ячеистые (поризованные) легкие бетоны получают за счет: газообразованием от специальных вспучивающих добавок, которые вследствие химической реакции выделения  $H_2$ , составляют пористую структуру раствора; добавлением пены, образованной путем взбивания водного раствора с пенообразователем под давлением компрессора; комбинированием газообразователей и пенообразователей.

Технология получения ячеистых бетонов автоклавного твердения основана на воздействии насыщенного пара, высокой температуры и давления на предварительно затвердевшую бетонную смесь. Данный материал нашел свою нишу в возведении многоэтажных зданий, так как он имеет оптимальные прочностные характеристики при высоких темпах производства.

Применение в разных областях строительства категории легких бетонов определяют к ним определенные физико-механические характеристики. На основе изучения действующих государственных стандартов универсальным в этом плане является конструкционно-теплоизоляционный бетон по ГОСТ 25820-2021 «Бетоны легкие. Технические условия», сочетающий в себе оптимальные прочностно-плотностные характеристики (рисунок 1.2).

Легкие бетоны получают за счет использования: пористых заполнителей с насыпной плотностью до  $1200 \text{ кг/м}^3$ , вяжущего вещества и воды. Для обеспечения более высокой прочности получаемого материала, возможно

добавление мелкого плотного заполнителя в виде кварцевого песка, который проникает в зазоры и межзерновое пространство. Для обеспечения высокой воздухоудерживающей способности и снижения расхода портландцемента допускается использование минеральных микрозаполнителей в виде дисперсных частиц.



**Рисунок 1.2** – Нормируемые физико-механические характеристики бетонов

По происхождению крупный заполнитель разделяется на природный, компоненты которого получаются из пемзы, известняка, вулканического туфа, древесины и искусственный, получаемый на основе техногенных отходов промышленности, а также из различных сырьевых материалов, которые подвергаются обжигу при высоких температурах.

На сегодняшний день производство изделий из легких бетонов имеет огромную долю в формировании рынка строительных материалов Российской Федерации. Применение их в строительстве позволяют снизить вес

железобетонных конструкций до 35%, повысить теплотехнические и акустические показатели зданий, повысить морозостойкость, снизить транспортно-монтажные расходы до 5%, понизить трудозатраты на строительном производстве до 50%, увеличить трудопроизводительность на 20%, что говорит о возрастающем высоком спросе на данные материалы.

Согласно данным банка ДОМ.РФ, в будущей пятилетней перспективе спрос населения на строительство частных домов составит около 3 млн. домов, или 450 млн. м<sup>2</sup> жилой площади. С 2022 года в России спрос на ипотечное кредитование в сегменте индивидуального жилищного строительства вырос втрое. Аналитики «Домклик» утверждают, что по состоянию на март 2024 года на территории РФ граждане оформили около 4,5 жилищных кредитов с общей стоимостью на 19 млрд. рублей, что стало абсолютным месячным рекордом.

Использование легкого бетона *в частном домостроении* приходит на замену деревянным конструкциям и разного рода кирпичей. Использование обычных бетонных блоков или армированного бетона создают в здании эффект «термоса», который негативно сказывается на микроклимате помещений в пиковые климатические периоды года. Пригодность легких бетонов в строительстве при различных климатических особенностях РФ, номенклатура материалов в их составе, особенности строительства малоэтажных зданий с их использованием, а также оценке их теплотехнической эффективности описаны во многих научных работах [3,4, 6-15].

Увеличение области применения легких бетонов *в многоэтажном строительстве* особенно в несущих элементах конструкций жилых, административных и производственных объектов говорит о его высокой экономической эффективности. В 1968 году на Международном конгрессе по легкому бетону в Лондоне был озвучен доклад [16] в котором были озвучены выводы о влиянии легкого бетона на стоимость многоэтажных зданий. Озвучивались такие преимущества как уменьшение веса конструкций, повышение теплотехнических показателей, а также уменьшение возникающих усилий. При этом важной характеристикой, обуславливающей меньшую

стоимость возведения каркаса конструкций, являлось возможность оптимизации отношения полезной нагрузки к собственному весу здания. Каркас из легкого бетона позволяет снизить размер несущих колонн и нагрузки на грунт.

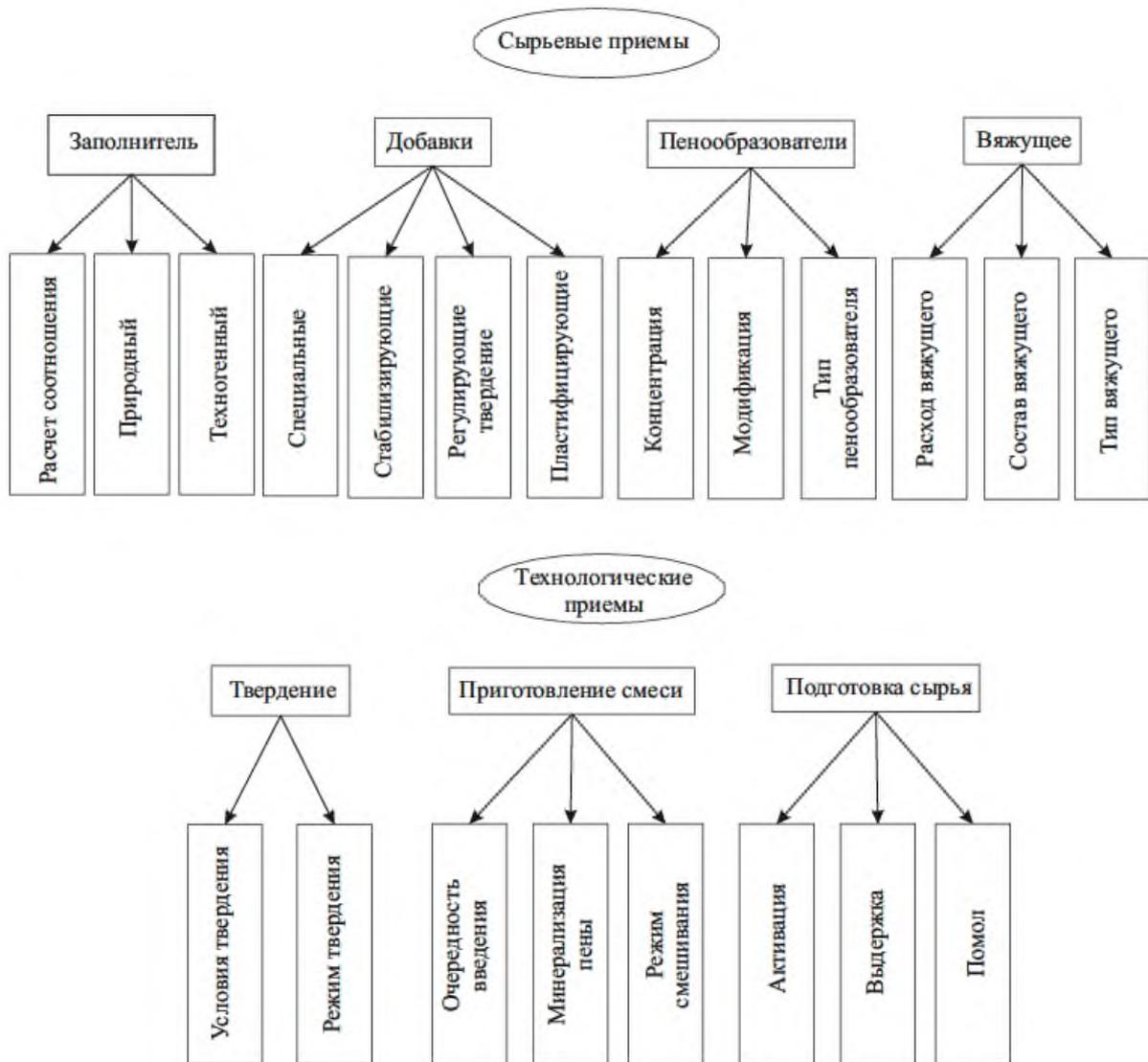
Репутация легких бетонов на отечественном рынке обеспечивается его продолжительным пребыванием на Российском строительном рынке. Впервые использование в качестве пористых заполнителей для бетона кирпичного щебня, шлаков от топки котельного оборудования были рекомендованы еще в конце 19 века профессором Н.А. Житкевичем. В 1912 году Н.А. Белелюбецкий предложил стеновые конструкции толщиной 0,45 метров из кирпичешлакобетонных камней. Преимущества легких бетонов на пористом заполнителе отмечают исследователи Ю.М. Баженов, В.С. Лесовик, И.Г. Горчаков, А.С. Иноземцев и др. [17-22].

В связи с устоявшейся тенденцией роста тарифов на энергоносители, существенно возрастает потребность в применении энергоэффективных и теплозащитных материалов. Актуальный на сегодняшний день СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» предусматривает повышенные требования к сопротивлению теплопередачи ограждающих конструкций. По сравнению со СНиП II-3-79\* «Строительная теплотехника» 1986 года требования к тепловой защите зданий выросли вдвое. В этой связи в условиях ужесточения законодательств, а также нормативной документации, в рамках обеспечения тепловой устойчивости ограждающих конструкций, строительное производство нуждается в материалах с низкими значениями коэффициента теплопроводности, но и обеспечивающими проектные прочностные характеристики [23-29].

Период с 1960-1980 года характеризуются развитием теоретического видения о структурообразовании легких бетонов [30-32]. На сегодня выделяют сырьевой и технологические способы улучшения технологических и эксплуатационных свойств изделий из легких бетонов.

Анализ основных путей повышения характеристик легкого бетона (рисунок 1.3.) показал, что для его получения возможно применение как и

сырьевых, так и технологических приемов. В качестве сырьевых приемов возможно использовать: вяжущие с различными добавками; пенообразователи различных типов и модификаций; введение добавок при приготовлении бетонных смесей; использование природных заполнителей. Стоит отметить, что этим методы можно применять в различных сочетаниях либо по отдельности.



**Рисунок 1.3** – Приемы повышения эффективности легких бетонов

Сущность сырьевого способа заключается в проектировании составов бетонов через подбор и модификацию ее компонентов для получения заданных эксплуатационных показателей с применением шлаковых, гипсовых, кремнеземистых, магнезиальных вяжущих и др. [33-37].

Как отдельную группу выделяют вяжущие из тонкомолотого цемента (ТМЦ) и вяжущие низкой водопотребности (ВНВ) с комплексом функциональных добавок [38-40].

Добавки для легких бетонов подразделяются в соответствии с их назначением.

1. Пластифицирующие, стабилизирующие, водоудерживающие;
2. Регулирующие твердение бетона;
3. Добавки-стабилизаторы;
4. Придающие бетону специальные свойства [41, 42].

Введение различного рода пластификаторов кроме полезного эффекта, может привести к дестабилизации материала, проявляющейся в форме склонности к расслоению и образованию воздушных полостей, что приводит к ухудшению характеристик теплопроводности и механической прочности легкого бетона.

Большинство современных бетонов содержат в своем составе минеральные добавки-модификаторы, которые по своей дисперсности подразделяются на добавки-разбавители и добавки-уплотнители структуры бетона. Авторами [43, 44] доказано, что введение микрокремнезема повышает прочностные характеристики мелкозернистого бетона.

Влияние кремнесодержащих добавок медно-никельного производства на прочностные свойства бетона были изучены авторами из Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И.В. Тананаева. Установлено, что введение в состав бетонов добавок  $\text{SiO}_2$  в количестве 0,5–2,0 мас. % повышает прочность бетона в проектном возрасте на 15–40 % по сравнению с бездобавочным составом. Добавки также увеличивают удельную прочность бетона до 38–40 МПа, что позволяет отнести разрабатываемые бетоны к классу высокопрочных ( $R_{уд} \geq 25$  МПа) [45].

Коллективом авторов под руководством Л.В. Ильиной [46] проведено исследование влияние нанокремнезема (кремнезоль НТЦ «Компас») и микрокремнезема (ОАО «Кузнецкие ферросплавы») в качестве модификаторов

легких бетонов на пеностеклокристаллическом заполнителе «КЕРВУД». Установлено, что существует оптимальное значение дозировки компонентов, при котором достигаются удовлетворительные прочностные характеристики. Так при добавлении нано-SiO<sub>2</sub> от 0,001 до 0,005% привело к снижению прочности легкого бетона на 26,7%. Максимальные прочностные характеристики образцов достигались при добавлении микрокремнезема 4 мас. % и нанокремнезема 0,001 мас.% от расхода портландцемента.

В статьях [47-49] отмечено, что предварительная обработка заполнителя кислотными растворами приводит к повышению активности поверхности, что позволяет повысить микротвердость контактной зоны и прочность легкого бетона. Для регулирования устойчивости пены предложено использование добавки золи кремниевой кислоты  $H_2SiO_3$  и гидроксида железа  $Fe(OH)_3$ . Результаты показали, что добавление золи кремниевой кислоты  $H_2SiO_3$  ведет к увеличению количества и размера пор, а также увеличению толщины пенной пленки, разделяющую воздушные поры от цементного камня.

Коллективом авторов из Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева проведено исследование легких бетонов с применением комплексных модификаторов - поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок разной химико-минералогической природы (кремнеземистая, сульфоалюминатная, карбонатная). Проанализирована кинетика набора прочности различных видов бетонов при сжатии и изгибе, модуля упругости при сжатии после экспонирования образцов исследуемых составов в нормальных влажностных условиях в течение 2, 4 и 6 месяцев [50-53].

Для повышения теплотехнических характеристик легких бетонов на пористых заполнителях выделяют два основных технологических приема:

1. Создание пористой структуры цементной матрицы;
2. Применение крупнозернистого пористого заполнителя без использования песка.

Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в составе бетонной смеси способствует улучшению технологических характеристик смеси и повышению качества затвердевшего бетона [54, 55]. В качестве пенообразователей используется несколько видов поверхностно-активных веществ: клееканифольный, смолосапониновый, алюмосульфатный и ГК). Расход пенообразователя для получения пены составляет соответственно 18...20%; 12...16%; 16...20% и 4...6% [56].

Технологическим барьером достижения высоких прочностных показателей в технологии легких бетонов на пористых заполнителях являются низкая прочность зерен и их высокая поглощающая способность легкого заполнителя, а также сложность его равномерного распределения в объеме материала [57].

Путем добавления пористых заполнителей в бетонную смесь имеется возможность регулирования пористости и прочности. Это возможно с помощью замены одного вида заполнителя другим или изменением плотности цементно-песчаной растворной смеси при неизменной пористости заполнителя [58].

Попов М.Ю., в рамках своего диссертационного исследования по изучению легких бетонов на гранулированном пеностекле, отмечает, что «высокое значение для характеристик легких бетонов на пористых заполнителях, имеет прочность связи между заполнителем и цементной матрицей».

Перспективным технологическим приемом для повышения скорости химической реакции при гидратации является измельчение вяжущего. Путем повышения площади удельной поверхности увеличивается поверхностная энергия, которая способствует высокой активности для последующих реакций внутреннего воздействия [59, 60]. Их применение позволяет повышать прочность цементного вяжущего, оказывает демпфирующее воздействие, выполняет функцию центров кристаллизации [61]. Использование минеральных добавок с высокой дисперсностью позволяет повысить потенциал вяжущих веществ, а также увеличить физико-механические характеристики [62, 63]. С повышением времени механоактивации вяжущего возрастают сроки

схватывания и нормальная густота композиции, соответственно увеличивается площадь удельной поверхности. Это позволяет препятствовать проникновению воды для гидратации [64].

Сегодня качество смешивания бетонной смеси оценивается лишь по прочности и однородности образцов-кубов, однако нет возможности определить степень распределения компонентов смеси. На основе анализа литературы отмечаются периодическая и непрерывная динамика процесса смешивания бетонной смеси, основными критериями которых являются эффективность работы смесителя [65], а также однородность смеси. Однородность смеси учитывали в своих работах И.К. Шарапов, В.Д. Мартынов, В.В. Кафаров. М.В. Бунин разработал систему критериев, характеризующую процесс формирования смеси во времени. Автор выделяет ключевой показатель - степень сепарации смеси, который учитывает удельное среднее отклонение объемной плотности компонентов смеси от средней плотности по всему объему смеси. Коллектив исследователей из БГТУ им. В.Г. Шухова выделяют процесс механического смешивания для многокомпонентных смесей и растворов, который осуществляется под воздействием внешних нагрузок, интенсифицирующих процессы массообмена [66, 67]. При механическом получении низкократной пены (кратность менее 6) оптимальным временем приготовления составляет 1,5–2 минуты при скорости вращения рабочего органа 500–1000 об/мин [55].

Для ускорения процессов твердения при получении пенобетонов применяется метод сухой минерализации пены, который способен повысить прочность материала, однако без добавления комплексных модифицирующих добавок отмечается повышенная усадка материала [68, 69].

Одним из немаловажных факторов, влияющих на формирование структуры материала, является режим твердения. В работе [70] отмечается, что увеличение времени твердения цементного камня кривая распределения пор по размеру идет в область более мелких пор, а поверхность пор с радиусами от 10 до 20 Å оказывается большей. А.Е. Шейкин в своей книге упоминает, что метод

пропаривания способствует уменьшению объема макрокапилляров, по сравнению с естественным процессом старения цементного камня, который ведет к увеличению макропористости [71]. Однако в исследованиях [72], напротив, отмечается увеличение количества крупных пор при температуре твердения до 100°C. Твердение цементного камня в воде вызывает уменьшение количества макропор, за счет увеличения количества микропор, которые приводят к повышению водонепроницаемости. Вышесказанное говорит об расхождении мнений исследователей о влиянии условий твердения на пористую структуру цементного камня. На основе исследований Г. Вербека, Дж. Таплина, Д. Кантро, У. Даниольсона и т.д., которые рассматривали влияние температуры твердения на степень гидратации во времени, делается вывод, что на ранних стадиях твердения скорость гидратации увеличивается при температурах 60-80°C [73], а при температуре в 80°C и выше происходит уменьшение степени гидратации на поздних сроках твердения, по сравнению с естественным температурно-влажностным режимом помещения [74].

Исследователям из Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в 2022 году были выданы патенты на изобретение [75, 76] по получению высокопрочных легких бетонах на полых микросферах со сниженным удельных расходом портландцемента на единицу проектной площади, в которой решаются проблемы контроля тепло-влажностного режима твердения вяжущего для достижения высших показателей механических свойств. Предложенное решение позволило повысить прочность при сжатии на 9,1% по сравнению с прототипом.

Исследователи Н.А. Попов, А.И. Ваганов [77] считали, что при создании легких бетонов на пористых заполнителях при принятом расходе портландцемента существует предельное значение прочности материала, которая не изменяется даже с ростом прочности растворной части. Повышение прочности материалов возможно только лишь за счет повышения прочности пористого заполнителя. Также А.И. Ваганов утверждает, что разрушение бетона зависит напрямую от предела сжимаемости одного из его компонентов.

Т.е. если пористый заполнитель имеет низкую прочность на сжатие, то дальнейшее повышение прочности растворной части не приводит к росту прочности и деформативной стойкости всего бетона, что приводит к достижению предельной прочности материала.

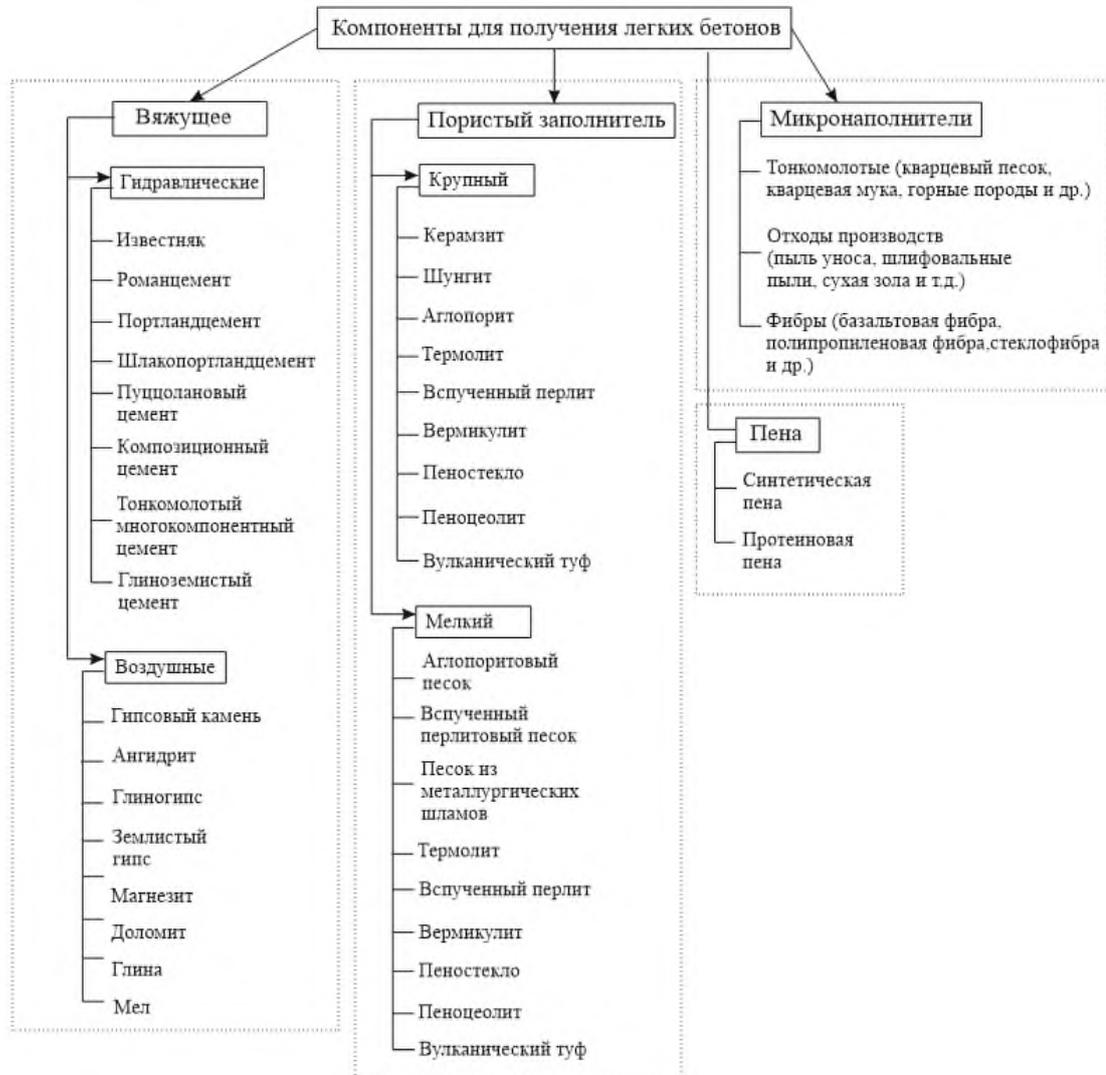
Из работы [78] следует, что пористые заполнители имеют высокую растяжимость. Поэтому обжатие и адгезия затвердевшего вяжущего повышают прочность заполнителя. Проведя анализ современных тенденций развития и эффективности использования легких бетонов в строительстве, коллектив авторов [79] пришел к выводу, что фактическая прочность пористого заполнителя в легком бетоне не является величиной постоянной и может повышаться с увеличением прочности цементно-песчаного раствора, а также зависит от технологических факторов приготовления бетонной смеси и дальнейшего твердения.

В научных трудах [80, 81] отмечается два этапа приготовления бетонных смесей с использованием гранулированного пеностекла. Первый этап подразумевает получение сухой смеси цемента и песка, а пористый заполнитель подвергается предварительному замачиванию в воде затворения. Второй этап – это перемешивание всех компонентов до получения бетонной смеси.

Таким образом, легкие бетоны на пористых заполнителях на сегодняшний день вызывают большой интерес со стороны производства и науки среди других конструктивно-теплоизоляционных строительных материалов, сочетающих в себе высокие прочностные и теплоизоляционные свойства и успешно применяемых как в многоэтажном, так и в частном домостроении. На сегодня для получения эффективных легких бетонов на пористых заполнителях необходимо обратить внимание на способы совершенствования характеристик материала через модификацию сырьевых компонентов, таких как вяжущие вещества и добавление структуроформирующих компонентов, а также за счет оптимизации технологических процессов приготовления смесей.

## 1.2. Компоненты для получения легких бетонов на пористом заполнителе

Перечень основных компонентов для получения легких бетонов представлен на рисунке 1.4.



**Рисунок 1.4** – Сырьевые компоненты для получения легких бетонов на пористом заполнителе

Балыков, А. С. в своем исследовании писал, что «в проектировании составов легких бетонов с пористыми заполнителями исходное сырье играет ключевую роль, т.к. сложность подбора составов обусловлена их многокомпонентностью и большим количеством параметров, оказывающих на основные показатели материала» [82].

**Портландцемент.** Гидравлическое вяжущее, которое изготавливается из карбонатных пород известняка, мела, кремнезема, глинозема. Производство регламентируется по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Получение портландцемента выполняется путем выпекания сырьевой смеси, в состав которой входят 22 – 25% глины и 75 – 78% известняка. Для выполнения общестроительных работ наиболее популярны портландцементы В32,5 (М400), В42,5 (М500), В52,5 (М600). Для повышения долговечности бетонных конструкций, а также повышения их коррозионной стойкости прибегают к использованию минеральных добавок [83].

**Золошлаки.** Изучением возможности применения золошлаковых отходов в производстве легких бетонов занимались Е.А. Бартеньева, С.Т. Кульшикова, В.В. Белов и др. [83-87]. С.Т. Кульшикова в своем исследовании отмечает: «применение топливных шлаков является экономичным и эффективным, он используется как часть вяжущего и как основной мелкий заполнитель». По химическому составу, согласно ГОСТ 25592-2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций» тип золошлаков определяется по виду сжигаемого топлива. В статье [88] отмечено, что золы могут применяться в качестве замены цемента в пенобетоне, способствовать образованию химических реакций, улучшающих характеристики материала [89].

**Пористые заполнители.** Являются ключевым структурным компонентом легких бетонов и выступает в роли крупного заполнителя, Технические характеристики основных видов пористых заполнителей приведены в таблице 1.3.

В последнее время для улучшения свойств легкого бетона и снижения его стоимости активно рассматриваются альтернативные виды пористых заполнителей. В работе [90] рассматривалась возможность использования аглопорита, полученного из отходов углеобогащения в качестве заполнителя для легкого бетона. Авторы отмечают, что кубическая форма заполнителя с высокой площадью поверхности обеспечивает повышенную прочность бетона. Также себестоимость конечного продукта из аглопорита из углесодержащих отходов будет меньше, по сравнению изделий с применением керамзита.

**Таблица 1.3** – Свойства пористых заполнителей применяемых для легких бетонов

Заполнитель	Крупный (гравий, щебень) заполнитель				Мелкий заполнитель (песок)
	Объемная масса в куске, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная объемная масса отдельных фракций, кг/м <sup>3</sup>	Прочность в стандартном цилиндре, МПа (кг/см <sup>2</sup> )	Объем межзернов- ых пустот, %	Насыпная объемная масса отдельных фракций, кг/м <sup>3</sup>
<b>Искусственные</b>					
Керамзит	600-1400	300-700	0,8-4,0 (8-40)	40-50	600-1000
Шлаковая пемза	500-1800	250-1000	0,1-2,7 (1-27)	55-70	475-1300
Аглопорит	700-1600	350-800	0,3-2,3 (3-23)	55-65	550-1100
Пеностекло	270-1200	120-450	0,5-6,0(5-60)	40-50	200-400
<b>Природные</b>					
Пемза крупнопористая	400-600	300-460	0,5-5 (5-50)	-	500
Пемза мелкопористая	1100-1800	600-900	1,6-15 (16-150)	-	700-1200
-	720-1300	400-500	1,7-6,7 (17-67)	-	600-750
-	880-1300	675-1200	0,1-15 (10-150)		
Известняки	1200-1800	750-1100	0,5-7 (5-70)		

Также для получения легких бетонов применяется гранулированное пеностекло (ГПС), которое занимает особое место у исследователей в связи с ежегодным увеличением отходов стекольной промышленности. Первые вспученные стекловидные заполнители в производственных условиях были получены И.И. Китайгородским.

В рамках диссертационного исследования М. Р. Арутюнян сформулирована следующая позиция: «использование пеностекла с насыпной плотностью 150 – 350 кг/м<sup>3</sup> позволяют получить конструкционно-теплоизоляционные бетоны с плотностью 500 – 900 кг/м<sup>3</sup>» [91], которые обладают повышенными значениями сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций за счет низкого коэффициента теплопроводности и плотности.

Исследователями из Томского политехнического университета впервые получен патент на шихту для производства пористого заполнителя на основе кремнистых пород – пеноцеолита [92]. Насыпная плотность шихт варьируется с

150–300 м<sup>2</sup>/кг. Вспенивание смеси происходит при температуре 850°С в течение 10 минут с последующим обжигом. При использовании щелочного компонента NaOH ученым удалось достичь снижение температуры вспенивания на 10%. Однако производство конструкционно-теплоизоляционных бетонов из такого сырья ограничивается территориями месторождений.

На территории Якутии развивается производство пористого заполнителя на основе природного цеолита Хонгуринского месторождения (пеноцеолит), согласно способу [93]. Пеноцеолит как пористый заполнитель имеет ряд ключевых преимуществ, такие как низкий коэффициент теплопроводности [94], высокая морозостойкость [2], что делает его идеальным для использования в суровых климатических условиях. Новизной решения является использование цеолитов, которые по своим свойствам обладают сорбционными способностями для поглощения свободного NaOH, который не успевал прореагировать с аморфным кремнеземом с образованием гидратированных силикатов натрия. Это решает проблему испарения не связанного щелочного компонента при нагревании в печи, которая приводит к износу печного оборудования. Техническим результатом предлагаемого способа является снижение себестоимости производства пористого заполнителя, упрощение технологического процесса его получения, а также получение более широкого диапазона плотности 100–600 кг/м<sup>3</sup> по формуле *«измельчение цеолитизированной породы»→«смешение в водным раствором NaOH»→«гранулирование смеси»→«опудривание тугоплавким порошком» → «сжигание в диапазоне температур 700–900°С».*

**Пена.** Это химические соединения со строением молекул, содержащие гидрофильные и углеводородные группы. Пенообразователи позволяют расширить пористую структуру бетонов для снижения их объемной массы и теплопроводности.

В работе [95] подробно описывается влияние пенообразователя на свойства бетона, а также подчеркивается его важность применения в формировании физико-механических характеристик материала. В строительстве

применяются два основных типа пенообразователей: синтетические и органические. Сами пенообразователи могут иметь высокую пенообразующую способность, но при смешении с цементно-песчаной суспензией терять значительную часть объема. Вышеупомянутые недостатки присущи синтетическим пенообразователям. В работе [96] обобщаются составы и свойства некоторых пенообразователей для их использования в производстве легких бетонов. Избыточное содержание пенообразователя приводит к замедлению сроков гидратации цемента, большей пористости материала, более тонким перегородкам [97, 98]. Исследование свойств матрицы легких бетонов на синтетическом пенообразователе проведено в работах [99-102]. Влияние органических пенообразователей на стабильность пенных систем в матрице легких бетонов анализировались учеными из БГТУ имени В.Г. Шухова [103].

***Микронаполнитель.*** В качестве микронаполнителей для бетонов применяются в основном молотый песок, зола, известняковая мука и т.д. При наполнении мелкозернистого бетона измельченным шлаком до удельной поверхности  $480 \text{ м}^2/\text{кг}$  происходит повышение прочности материала [104], что позволяет считать перспективным использование шлаковых микронаполнителей, получаемые в процессе сжигания угольного топлива. В ходе проведения исследования свойств отсева бетонного лома как микронаполнителя, авторами [105] установлено, что помол отсева дробления бетонного лома включается в процесс твердения композита. В статье [106] обсуждается, что микронаполнители, в виду результата как физического, так и химического воздействия на цементную матрицу, снижают пористость контактной зоны и повышают плотность микроструктуры. На основе данных сканирующей электронной микроскопии [107] видно, что пуццолановая активность микронаполнителя в виде золошлака способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, которые формируют прочную связь.

***Добавки.*** Применение пластифицирующих добавок позволяют улучшить свойства бетонной смеси, повысить ее пластичность, а готовую конструкцию – более прочной и качественной. Благодаря их добавлению в бетонную смесь

происходит равномерное распределение цемента, повышается удобоукладываемость, снижается расход на воду. Однако их использование во вспененных растворах оказывают отрицательное влияние. Повышается водоцементное отношение, снижается толщина и прочность межпоровых перегородок.

В статье [108] исследуется изменение морозостойкости бетона при добавлении в бетонную смесь ретиспергируемых полимерных порошков (РПП). При повышении дозировки РПП до 2% выявлена тенденция к росту прочности сцепления на 30%, а при добавке 3% рост прочности сцепления составил 130%. «Включение ретиспергируемых полимерных порошков обеспечивает снижение показателя уровня напряжений при вынужденных деформациях за счет различного влияния на прочностные и деформационные свойства и способствует повышению сцепления нового бетон с бетонным основанием» [109].

Таким образом, проектирование составов легких бетонов на пористых заполнителях представляет собой сложную многопараметрическую задачу, где ключевую роль играет правильный подбор и комбинирование исходного сырья. Портландцемент служит основным вяжущим, дозировка и марка которого непосредственно влияет на класс прочности бетона. Пористый заполнитель формируют ячеистый каркас, определявший плотность, прочность и теплоизоляционные свойства бетона. Пена и микрозаполнители позволяют управлять структурными характеристиками растворной части бетона. Химические добавки корректируют реологические свойства смеси и финальные характеристики затвердевшего материала, повышая его удобоукладываемость и прочность. Для полного и эффективного использования возможностей сырья в технологии производства легких бетонов должно быть рациональное сочетание этих компонентов исходя из заданного баланса конструктивных и теплоизоляционных свойств.

### **1.3. Эффективность использования цементных композиционных вяжущих**

История разработки и совершенствований строительных растворов проходит длинный путь эволюции. Так в 1825 году в своей книге Е.Г. Челиев описал свое изобретение – цемента для подводных работ, схожий с портландцементом. В обзорной части статьи [110] написано, что в начале 19 века начали использоваться растворы на основе высокопрочных вяжущих. В цемент добавлялись различные смолы, мыла, пепел и др., что приводило к улучшению характеристик материала. На сегодняшний день очень широко используются строительные отходы [111], которые позволяют повысить прочностные характеристики бетона [64, 112, 113] и улучшить экологическую обстановку [114-116]. Наблюдается переориентация промышленности строительных материалов в сторону бетонов с пониженным расходом цемента [117-120]. Композиционные вяжущие, в которых клинкерная составляющая заменена на 10–90% кремнеземсодержащими компонентами являются перспективными материалами, которые могут стать основой для создания нового поколения бетонов. Однако одной из основных причин, сдерживающих их широкое применение является высокий расход энергии на изготовление композиционного вяжущего [121].

Анализ литературных данных [122-124] показывает, что в дорожном хозяйстве для получения эффективных материалов необходимо использовать цементные композиционные вяжущие с активными минеральными добавками природного и техногенного происхождения с удельной поверхностью от 450 – 600 м<sup>2</sup>/кг.

Основная суть в получении композиционных вяжущих заключается в использовании различных активных минеральных добавок и наполнителей с более мелкой дисперсностью, по отношению к частицам цемента, что позволяет улучшить свойства вяжущего и конечного материала. Автор статьи [125] приходит к выводу, что использование портландцемента в виде компонента композиционного вяжущего оказывает максимальный эффект в

минимизации побочных эффектов от введения комплексов добавок (минеральных и химических) друг от друга. Р.З. Рахимов в своей работе [126] производит расчеты плотности упаковки композиционных вяжущих с керамзитовой пылью и приходит к выводу, что фракционный состав композиционного вяжущего с тонкостью помола  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$  обеспечивает самую высокую плотность упаковки его зерен, чем при тонкости помола от 250 – 800  $\text{м}^2/\text{кг}$ . Наибольшую эффективность по данным исследований [112, 127-132] имеют композиционные вяжущие с удельной поверхностью  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Современные достижения научных исследований и технологий в области строительного материаловедения свидетельствуют о возможности получения эффективные вяжущих веществ из местного природного и техногенного сырья для растворов и бетон различных классов по плотности, теплопроводности, прочности и других показателей [133].

Авторы из БГТУ имени В.Г. Шухова утверждают, что шлаки требуют более тонкого измельчения для того, чтобы раскрыть свой гидравлический потенциал. При совместном помоле с цементным клинкером, который имеет высокую скорость размалывания, шлак не в полной мере проявляет свои гидравлические свойства. Так при совместном помоле отходов магнитной сепарации железистых кварцитов, цемента, добавки суперпластификатора СП-1 от 5 до 10 минут наблюдается прирост удельной поверхности до 37%, а от 10 до 15 минут – 87%, повышая прочностную матрицу затвердевшего вяжущего [134, 135]. Основной целью совместного помола портландцементного клинкера с органическими добавками, вносимыми в бетонную композицию, является установление физико-химических связей между активной поверхностью частиц клинкера и органической добавки, которые организуют совместное взаимодействие [136]

На сегодняшний день одной из приоритетных задач в области строительного материаловедения является разработка методов повышения реакционной способности портландцемента. Ввиду высокой энерго- и ресурсоемкости его производства, приобретают актуальность исследования,

направленные на активацию вяжущего с целью снижения его расхода во всех распространенных видах бетонов.

Наряду с этим активно развивается применение тонкомолотых многокомпонентных цементов (ТМЦ) и вяжущих низкой водопотребности (ВНВ), которые получают путем измельчения до удельной поверхности порядка 400–600 м<sup>2</sup>/кг, приводящей к его механической активации.

Классификации ТМЦ и ВНВ описаны в [18]. Механизм улучшения свойств композиционных вяжущих объясняется авторами [137-140].

В качестве основных перспективных направлений учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова рассматриваются различные материалы, в первую очередь, это отходы горнодобывающей промышленности [141, 142] и отходы алмазодобывающей и обогащательной отрасли [143, 144]. Во-вторых, это природные минеральные материалы, такие как вулканический пепел и вулканические породы [117, 145-147], а также разнообразные по составу и генезису пески, в частности, кварцевые пески различного месторождения [148-151].

К числу минеральных добавок для бетонов можно отнести и природные цеолиты [152]. В данном материале содержится большое количество реактивных силикатов и алюминатов. При контакте цементно-водной смеси с природным цеолитом происходит разрушение алюмосиликатного каркаса под воздействием  $\text{OH}^-$  в растворе с высоким рН [153]. Образуются гидратированные соединения силиката кальция и алюмината кальция, очень схожие на те, что образуются при гидратации цемента [154]. Добавка до 30 масс.% цеолитов приводит к увеличению удельной поверхности вяжущего, уплотняя структуру цементного теста и снижая пористость [155, 156], также установлено, что существует определенный диапазон, равный 20–25% от массы композиционного вяжущего, который приводит к получению оптимального состава бетона. Отмечается высокая устойчивость бетонов с цеолитом на трещинообразование.

В результате исследовательских работ многих авторов, комплексный эффект от использования ВНВ и ТМЦ выражается в сокращении расхода

портландцементного клинкера. Это способствует оптимизации физико-механических характеристик бетона и позволяет минимизировать введение дополнительных добавок для регулирования свойств, что упрощает производственный цикл.

Современные ученые все чаще приводят в своих трудах результаты исследований по возможности применения золошлаковых отходов от сжигания углей как компонента композиционных вяжущих. Исследователи из Ханойского горно-геологического университета (г. Ханой) и Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (г. Москва) в ходе совместной работы выявили, что введение в состав вяжущего золошлаковых отходов не оказывает влияние на кинетику твердения. Также введение до 20% золошлаковых отходов не снижает прочности раствора на основе композиционных вяжущих [158]. Учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова (г. Белгород) рассмотрено композиционное вяжущее с использованием золошлаковых отходов. Установлено, что композиционное вяжущее на золе имеет тонкую фракцию с основным диапазоном частиц от 1,1–40,45 мкм, что в дальнейшем приводит к увеличению водопотребности, что и далее подтверждается экспериментально в работе [159].

В рамках данной диссертационной работы применение природного цеолита месторождения Хонгуруу для получения композиционного вяжущего обосновывается из соображения применения местного минерального сырья, способствующего развитию региональной сырьевой базы Республики Саха (Якутия). Большой объем научных исследований в области применения цеолитсодержащего сырья в качестве компонента вяжущего выполнен В.Н. Смиренской [160] и Л.Н. Марковой [161].

Следовательно, использование композиционных вяжущих способствует формированию композитов с максимальной эффективностью в использовании ресурсов и энергии, а также с уменьшенным потреблением материалов, в том числе цемента, являющегося одним из наиболее дорогостоящих компонентов в бетонных смесях.

Таким образом, за счет применения композиционных вяжущих возможно получать строительные материалы с оптимальными физико-механическими показателями, снижая количество вводимого портландцемента, который является самым дорогостоящим компонентом бетонных смесей. Положительный опыт применения природного цеолита как пуццолановой добавки в современных исследованиях, а также региональная доступность предопределяет его выбор в данной работе. Эффективность его применения, заключающаяся в образовании дополнительных гидратных соединений при взаимодействии с цементом, требует дополнительных исследований для определения весомости вклада в эксплуатационные характеристики бетонов. При этом потенциальное решение параллельных экологических и экономических задач, связанных с сокращением энергозатрат на производство бетона и расширения сырьевой базы за счет местных ресурсов, делает разработку композиционных вяжущих с применением природного цеолита высокоактуальным и перспективным направлением для строительной отрасли.

#### **1.4. Способы формирования структуры легких бетонов**

Строительный опыт показывает, что применение легких бетонов на пористых заполнителях в возведении ограждающих конструкций пользуется спросом. Их применяют в возведении наружных ограждающих конструкциях [162, 163], а также в несущих конструкциях зданий и сооружений [164, 165]. Также легкие бетоны начали использовать в технологии 3D-печати [166, 167]. Несмотря на то, что эффективность легких бетонов различного состава доказана многолетним опытом применения в различных сферах производственной инфраструктуры РФ, имеются вопросы, связанные с формированием структур и их влияния на физико-механические свойства изделий.

Профессор И.Н. Ахвердов [168] в своих трудах считает, что в идеале бетон должен быть однородным материалом, в котором зерна заполнители и цементный камень должны составлять сплошной монолит. Также он утверждает, что в качестве идеальной модели должен быть принят пористый заполнитель

ноздреватой структуры, схожим с аглопоритом. В конечном итоге И.Н. Ахмедов приходит к выводу о том, что прочность легких бетонов определяется активностью цемента и пористости всей системы, зависящей от В/Ц.

По мнению А.И. Ваганова [169] «у каждого пористого заполнителя существует некоторое значение прочности, дальнейшее повышение которого можно повысить за счет добавки портландцемента». Однако это достигается лишь в небольшой степени, т.к. существуют и другие факторы, влияющие на предел прочности легких бетонов: количество заполнителя в 1 м<sup>3</sup> бетона; зерновым составом; предельной крупностью.

Большой объем работы по изучению структуры легких бетонов на природных пористых заполнителях был проделан профессором М.З. Симоновым. В его исследованиях подробно исследуется влияние самовакуумирования, при соответствующих В/Ц цементного теста, которое оказывает положительное влияние на прирост прочности легкого бетона [170, 171].

На основе исследований по развитию представления формирования структуры легких бетонов, Ю.Е. Корнилович, Г.А. Бужевич, М.Г. Вержбицкий, Ю.Д. Набиевский пришли к выводу, что «разрушение легкого бетона имеет одну стадию и происходит вследствие одновременного, а не последовательного разрушения цементного камня и заполнителей» [172, 173]. Также они отмечают, что главным фактором в достижении прочности бетона является активность вяжущего, характеризующаяся показателями адгезионных и когезионных свойств.

Работа по изучению прочностных характеристик аглопоритбетона с межзерновой пустотностью была проделана С.М. Ицковичем С.М. [174]. Автор исследований отмечает, что «прочность аглопоритбетона равна прочности цементного камня и аглопорита», а также «при прочих равных условиях определяются относительной плотностью, а также характером пористой структуры».

О. Я. Берг в своей научной работе [175], изучая уровни параметрических точек, пришел к очень важному выводу – прочность сцепления между

растворной частью и заполнителем у легких бетонов выше, чем у тяжелых. Из литературных источников следует, что сила сцепления пористого заполнителя по сравнению с плотным щебнем возрастает в 1,7–2,5 раза. Ю.Е. Корнилович в своей работе о формуле прочности легких бетонов описывает три возможных случая прохождения разрушений в бетонах: по растворной части при неразрушенном заполнителе; по растворной части и линии контакта между растворной частью и заполнителем; по заполнителю и растворной части. Для легких бетонов на пористом заполнителе характерны второй и третий случай разрушения. Б.Н. Виноградов полагает [176], что оптимальный состав контактного слоя между пористым заполнителем и цементным тестом состоит из 60–70% гелевидных гидросиликатов кальция и 30–40% кристаллических новообразований. Гидрогранты образуют хорошее соединение с цементным камнем, повышающие прочностные характеристики. Из этого можно сделать вывод, что сила сцепления является одной из основных особенностью структуры легкого бетона, предопределяющая несколько иную схему разрушения, чем у тяжелых бетонов.

В.М. Москвин, продолжая исследования ученых из Иллинойского университета (США, Чикаго) Т.Шу и Ф. Слейта, показал, что в первую очередь микротрещины появляются в легком заполнителе, т.к. прочность окружающего цементного раствора и его сила сцепления в разы больше прочности легкого заполнителя [177].

Влияние золошлаковых отходов на структуру бетонов были рассмотрены в работах [178-181]. Так при изучении процессов гидратации было установлено, что на рентгенограмме цементно-золяного вяжущего фиксируются рефлекссы, принадлежащие клинкерным элементам. Кроме того, прослеживаются образования минералов, принадлежащим золоотходам – кварц, магнетит, графит [182]. При введении тонкодисперсного золошлака образуется увеличенная дополнительная поверхность, на которой могут отлагаться продукты гидратации цемента, а частички золошлака могут служить центрами кристаллизации, что и приводит к большей степени гидратации в раннем

возрасте. Основываясь на работах [183-186], в статье [187] подробно представлен механизм взаимодействия частиц золы с продуктами гидратации цемента. Микрозаполнители в легких бетонах способствуют снижению усадочной деформации контактного слоя и уменьшают ползучесть бетона. А.С. Иноземцев в своей работе [188] по изучению реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах в качестве минеральной части использует кремнеземистый заполнитель полидисперсного состава, который обеспечивает получение плотного каркаса за счет заполнения пустот между заполнителем.

Одним из ключевых компонентов в структуроформировании легких бетонов является пенообразователь, которое определяет технические и эксплуатационные характеристики, а также участвует в образовании устойчивости пены. Преимущественное количество пенообразователей – это соединения гидрофильной группы (ОН, СООН, NH<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>H и др.) и углеводородные радикалы вместе с добавками загустителями. В работе [95] изучается влияние дозировки пенообразователя на теплопроводность и прочность на сжатие пенобетона. Получено, что недостаток пенообразователя приводит к получению нестабильных пен, которые в свою очередь поспособствовали ухудшению коэффициента теплопроводности, а избыток пенообразователя отрицательно влияет на прочностные характеристики. В статье [189] утверждается, что добавление дополнительных цементирующих материалов в состав вяжущего позволяет улучшить структуру пор и обеспечить стабильность вспененного вещества.

Проведенный анализ научных трудов показал, что формирование структуры легких бетонов представляет собой сложный многоуровневый процесс, определяемый свойствами пористых заполнителей, цементного камня и композиционного вяжущего. Ряд исследователей отмечает ключевую роль характера сцепления и структуры контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в прочности бетона. Рационализация состава контактного слоя, заключающаяся в формировании однородной и монолитной растворной части

легкого бетона за счет применения микронаполнителей (таких как золошлаковые отходы) и регулирования порообразования позволит значительно повысить прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

### **1.5. Выводы по главе 1**

1. Легкие бетоны на пористых заполнителях на сегодняшний день вызывают большой интерес со стороны производства и науки среди других конструктивно-теплоизоляционных строительных материалов, сочетающих в себе высокие прочностные и теплоизоляционные свойства и успешно применяемых как в многоэтажном, так и в частном домостроении. На сегодня для получения эффективных легких бетонов на пористых заполнителях необходимо обратить внимание на способы совершенствования характеристик материала через модификацию сырьевых компонентов, таких как вяжущие вещества и добавление структуроформирующих компонентов, а также за счет оптимизации технологических процессов приготовления смесей.

2. Проектирование составов легких бетонов на пористых заполнителях представляет собой сложную многопараметрическую задачу, где ключевую роль играет правильный подбор и комбинирование исходного сырья. Портландцемент служит основным вяжущим, дозировка и марка которого непосредственно влияет на класс прочности бетона. Пористый заполнитель формируют ячеистый каркас, определявший плотность, прочность и теплоизоляционные свойства бетона. Пена и микронаполнители позволяют управлять структурными характеристиками растворной части бетона. Химические добавки корректируют реологические свойства смеси и финальные характеристики затвердевшего материала, повышая его удобоукладываемость и прочность. Для полного и эффективного использования возможностей сырья в технологии производства легких бетонов должно быть рациональное сочетание этих компонентов исходя из заданного баланса конструктивных и теплоизоляционных свойств.

3. За счет применения композиционных вяжущих возможно получать строительные материалы с оптимальными физико-механическими показателями, снижая количество вводимого портландцемента, который является самым дорогостоящим компонентом бетонных смесей. Положительный опыт применения природного цеолита как пуццолановой добавки в современных исследованиях, а также региональная доступность предопределяет его выбор в данной работе. Эффективность его применения, заключающаяся в образовании дополнительных гидратных соединений при взаимодействии с цементом, требует дополнительных исследований для определения весомости вклада в эксплуатационные характеристики бетонов. При этом потенциальное решение параллельных экологических и экономических задач, связанных с сокращением энергозатрат на производство бетона и расширения сырьевой базы за счет местных ресурсов, делает разработку композиционных вяжущих с применением природного цеолита высокоактуальным и перспективным направлением для строительной отрасли.

4. Формирование структуры легких бетонов представляет собой сложный многоуровневый процесс, определяемый свойствами пористых заполнителей, цементного камня и композиционного вяжущего. Ряд исследователей отмечает ключевую роль характера сцепления и структуры контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в прочности бетона. Рационализация состава контактного слоя, заключающаяся в формировании однородной и монолитной растворной части легкого бетона за счет применения микрозаполнителей (таких как золошлаковые отходы) и регулирования порообразования позволит значительно повысить прочностные и эксплуатационные характеристики материала.

## **2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В основу методологии положен системный анализ системы «состав – структура – свойства», позволяющей установить влияние применяемых компонентов на функциональные характеристики получаемого материала. В диссертационной работе применялись основные сырьевые компоненты, применяемые на строительном производстве Республики Саха (Якутия), что подчеркивает прикладную направленность исследования. В частности, были использованы: пеноцеолит производства ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар), природный цеолит месторождения Хонгуруу Сунтарского улуса, цемент завода «Якутцемент» (пгт. Мохсоголлох) марки ЦЕМ I 42,5Н, золошлаковая смесь котлового завода ООО «Якутский котловой завод», пенообразователи – ПБ-2000, Rospena, FoamСem.

Исследование характеристик сырья и свойств получаемого материала проводилось в соответствии с действующими нормативными документами, регламентирующими методы испытаний. Экспериментальные исследования проводились с использованием сертифицированного и поверенного лабораторного оборудования при специализированных лабораториях.

### **2.1. Методы исследований**

Результаты экспериментальных исследований применяемых сырьевых материалов были получены с использованием материально-технической базы следующих организаций:

1. ФГАОУ ВО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (СВФУ, г. Якутск);
2. ФГБУ «Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск);

3. ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ, г. Белгород);

4. ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФТПС СО РАН, г. Якутск).

Зерновой состав, определение содержания пылевидных и глинистых частиц, значения насыпной и истинной плотности определялись в соответствии с методами испытаний по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Для высушивания аналитических проб применялся универсальный сушильный шкаф SNOL 58/350.

Минералогический состав образцов определен методом *качественного* РФА (рентгенофазовой диагностики) с использованием дифрактометра D2 PHASER Bruker на базе лаборатории ИГАБМ СО РАН CuK $\alpha$ -излучения под напряжением 30 кВ с силой тока 10 мА в интервале 4,5-65° (2 $\theta$ ). Для идентификации выявленных минералов использовалась база данных PDF-2/Release 2011 RDB.

Исследование и анализ микроструктур проводились на основе метода *растровой электронной микроскопии* при помощи высокоточного микроскопа JEOL JSM-7800F. Получение изображений происходит за счет ускоряющих напряжений. Характеристики оборудования представлены в таблице 2.1.

Для изучения *размолоспособности* используемых кварцсодержащих материалов производился помол до удельной поверхности 520–550 м<sup>2</sup>/кг при помощи планетарной шаровой мельницы RETSCH PM400, в которую входит четыре размольные станции для размольных стаканов с мелющими шарами. Номинальный объем каждого стакана – 500 мл. Максимальная частота вращения планетарной шаровой мельницы составляет 400 оборотов в минуту. Направление вращения общего планетарного диска противоположно вращению размольных стаканов.

**Таблица 2.1** – Технические показатели растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F

Показатель	Значение
Пространственное разрешение	0,8 нм (15 кВ), 1,2 нм (1 кВ), 3,0 нм (15 кВ, 5 нА, рабочий отрезок 10 мм)
Ускоряющее напряжение	10 В - 30 кВ
Диапазон увеличений	от x25 до x1 000 000
Ток пучка	1 пА - 200 нА
Диапазон рабочих отрезков	от 2 до 25 мм
Катод	Шоттки
Диапазон токов пучка	1 пА - 200 нА
Операционная система	Для MS Windows

Определение *морозостойкости* цементного камня с применением природного цеолита осуществлялось по ультразвуковой методике, описанной в ГОСТ 26134-2016 "Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости". Методика заключается в измерении времени распространения ультразвука в процессе их попеременного замораживания и оттаивания, с последующим определением той точки, с которой происходит резкое увеличение времени распространения ультразвука, определяющей морозостойкость испытуемых образцов.

*Анализ гранулометрии* молотых материалов проводился с использованием лазерного прибора для измерения частиц – FRITSCН Analysette 22 NanoТес Plus на базе лаборатории БГТУ им. В.Г. Шухова. Управление, регистрация и анализ результатов измерений производились на основе поставляемого с прибором программным обеспечением.

Оценка качества минерального неорганического сырья, с точки зрения его пригодности в качестве компонента композиционного вяжущего, производилась на основе научно-методических принципах, разработанных в

рамках диссертационного исследования Р.В. Лесовика [115]. В основу данной методики положен сравнительный анализ активности образцов композиционного вяжущего с равными долями (50/50) тонкомолотого цемента и исследуемого материала. Активность, определяемая как прочность образцов на 28 сутки, соотносится с контрольными значениями, полученные на изучаемом песке ( $R_A^И$ , МПа) и на кварцевом песке Вольского месторождения ( $R_A^{В.И.}$ , МПа), принятые в качестве образца для сравнения. Оптимальная удельная поверхность композиционных вяжущих для проведения оценки качества, согласно методике, составляет порядка 500 м<sup>2</sup>/кг.

Коэффициент качества определяется по формуле (2.1):

$$K_k = \frac{R_A^И}{R_A^{В.И.}} \quad (2.1)$$

Определение *сорбционной способности* веществ осуществлялось с помощью методики, описанной в [190]. Согласно методике, в цилиндрический сосуд помещается концентрированный известковый раствор в объеме 1,1 литров. Далее после перемешивания в течение 10–15 минут отбиралась исходная проба объемом 100 мл с последующим его фильтрованием. Начальная концентрация оксида кальция СаО устанавливалась методом титрования 50 мл отфильтрованного раствора с раствором соляной кислоты НСl. Затем в основной цилиндрический сосуд вводилась навеска исследуемого материала с массой 10 г. По истечении заданного временного промежутка отбирались пробы объемом 100 мл. Каждая проба фильтровалась в мерную колбу на 250 мл. Из полученного фильтрата отбиралось 50 мл фильтрата, в которой определялась текущая концентрация СаО путем титрования тем же раствором НСl. Концентрацию оксида кальция СаО в растворе определяли титрованием 0,05 Н раствором соляной кислоты НСl и рассчитывали по формуле (2.2):

$$C_{CaO} = \frac{758 \cdot A \cdot T}{B} \quad (2.2)$$

где,  $C_{CaO}$  – концентрация СаО, г/л;

$A$  – концентрация НСl, израсходованной на титрование, мл;

$T$  – титр соляной кислоты HCl;

$B$  – количество отобранного из цилиндрической емкости раствора, мл.

Определение тонкости помола по *удельной поверхности* помолотых порошков материалов определялась при помощи прибора ПСХ–12, работающий по методу воздухопроницаемости, согласно ГОСТ 310.2–76 "Цементы. Методы определения тонкости помола", который заключается в измерении сопротивления, оказываемого воздуху, просасываемому через слой молотого материала установленной толщины и площади поперечного сечения. Данный прибор отвечает требованиям соответствующих технических условий (таблица 2.2). Прибор рассчитывает значения удельной поверхности ( $S$ , см<sup>2</sup>/кг) и среднемассовый размер частиц ( $d$ , мкм), отображая полученные данные на встроенном дисплее. Результаты измерений данного прибора соответствуют европейским (DIN, ISO) и американским стандартам (ASTM).

**Таблица 2.2** – Технические характеристики прибора ПСХ-12

Показатель	Значение
Диапазон измерений удельной поверхности, см <sup>2</sup> /г	200–50000
Диапазон измерений среднего размера частиц, мкм	0,5–250
Аппаратурная погрешность, не более %	±1
Потребляемая мощность (220 В ; 50 Гц), Вт	30
Габариты упаковки, мм	350x400x550
Масса без NB, кг	2,5

**Прогнозирование прочностных характеристик** композиционных вяжущих осуществлялось на основе анализа кинетики их твердения в соответствии с научно-методологическим подходом, разработанным д.т.н., профессором Ш.М. Рахимбаевым [191]. В основе данного метода лежит применение расчетов, базирующихся на теории переноса [192]. Процесс твердения и набора прочности описывается по формулам (2.3) и (2.4):

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \cdot \sigma \quad (2.3)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \cdot \tau \quad (2.4)$$

где,  $\sigma$  – предел прочности при сжатии, МПа;

$\tau$  – время твердения (гидратации), сут;

$\left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0$  – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации),

сут/МПа;

$k_1, k_2$  – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

Определение изменения массы образцов, скорости изменения массы проводилось с использованием метода *дифференциальной сканирующей калориметрии* при помощи прибора NETZSCH – STA 449C Jupiter (табл. 2.3). Изучаемые образцы в PtRh тиглях нагревались от комнатной температуры до 1000°C со скоростью нагрева 10°C/минута, в инертной среде–аргон.

**Таблица 2.3** – Технические характеристики прибора NETZSCH – STA 449C Jupiter

Показатель	Значение
Температурный диапазон, °С	-150–2000
Скорость охлаждения/нагрева, К/мин	0,001–50
Максимальная масса, мг	5000
Разрешение ТГ, мкг	0,025

Исследование *характеристик пенообразователей* проводилась по комплексу критериев, включающих кратность пены, стойкость пены во времени, стойкость пены в растворе и в легком бетоне, а также экономический фактор (стоимость). Кратность и стойкость пены определены по ГОСТ 50588–2012 "Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования

и методы испытаний". Кратность пены определялась как отношение объема полученной пенной массы к объему исходного раствора пенообразователя. Получение пены осуществлялось при помощи лабораторного пеногенератора. Определение показателя устойчивости пены описывается как время, за которое выделяется жидкость в количестве 50% от используемого для формирования пены раствора. Стойкость пены во времени и ее устойчивость в поризованном растворе, определялась по методикам, предложенным В.А. Мартыненко, заключающийся в отношении объема пенной смеси к общему объему применяемых компонентов по отдельности [193]. Физический смысл синерезиса, заключается в процессе стекания избыточной жидкости с поверхности сформировавшихся пленок пены и ее последующим стеканием в нижние слои.

**Приготовление бетонных смесей** производилось в соответствии с ГОСТ 7473–2010 «Смеси бетонные. Технические условия» при помощи гравитационного бетоносмесителя, а также согласно способам, предложенных в источниках под авторством А.Н. Давидюка, Г.В. Сопегина и Н.С. Семейных [80, 81].

**Технические характеристики золошлаковых отходов**, образованные при совместном удалении золы и шлака механическим способом в процессе сжигания бурого угля ООО «Якутский котловой завод», определялись согласно ГОСТ 25592–2019 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия».

Методы определения **физико-механических свойств образцов пеноцеолитбетона** приведены в таблице 2.4. Испытания производились с использованием поверенного исследовательского оборудования лаборатории «Строительные материалы и изделия» кафедры «Прикладная механика и строительное материаловедения» СВФУ им. М.К. Аммосова.

**Теплоемкость** материалов была оценена методом дифференциальной сканирующей калориметрии с помощью прибора SENSYS evo TG-DSC (табл.

2.8) на базе Отдела №80 тепломассообменных процессов Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (г. Якутск).

**Таблица 2.4** – Методы определения физико-механических свойств

№	Определяемый параметр	Нормативная документация	Примечание
1	Средняя плотность	ГОСТ 12730.1–2020 «Бетоны. Методы определения плотности»;	
2	Морозостойкость	ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»	Третий ускоренный метод. Технические характеристики камеры ЭКК-15 приведены в таблице 2.5
3	Прочность на сжатие	ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии»	Для цементного камня
		ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»	Для образцов-кубов с размером ребер 100 мм.
4	Водонепроницаемость	ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»	Характеристика прибора УВБ-МГ4.01 приведена в таблице 2.6
5	Теплопроводность	ГОСТ 30256–94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности»	Характеристика прибора ИТП–МГ4 «100» приведена в таблице 2.7

**Таблица 2.5** – Технические характеристики климатической камеры ЭКК-15

Показатель	Значение
Температура в морозильной камере, °С	-50
Неравномерность температуры по объему холодной зоны, °С	1,5
Время установки температурного режима -50°С, мин	150
Напряжение питающей сети холодильной машины, В	380±10%
Максимальная потребляемая мощность, кВт	4,6
Холодильный агент	Фреон R404a

**Таблица 2.6** – Технические характеристики установки для образцов бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4.01

Показатель	Значение
Диапазон задаваемого избыточного давления, МПа	От 0 до 2,0
Давление воды на ступенях нагружения, МПа	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0
Основная относительная погрешность поддержания давления на ступени нагружения, %	3
Количество образцов одновременно устанавливаемых в установке, шт.	6
Диаметр бетонных образцов, мм	150
Диапазон временных интервалов задаваемых на каждой ступени нагружения, мин	0÷30; 240; 360; 720; 960
Водоснабжение обратное. Объем жидкости заливаемой в бак, л	10
Установленная мощность, кВт	1,5
Напряжение питания, В	220

**Таблица 2.7** – Технические характеристики измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 «100»

Показатель	Значение
Диапазон измерений теплопроводности, Вт/м·К	0,02–1,5
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения теплопроводности при стационарном тепловом режиме, %	±5,0
Диапазон регулирования температур, °С	
– холодильника	5–25
– нагревателя	25–60
Напряжение питания переменного тока, В, частота, Гц	230 (115) 50
Потребляемый ток, мА	250
Время единичного измерения, мин	120

**Таблица 2.8** – Технические характеристики прибора SETARAM SenSys DSC evo

Показатель	Значение
Диапазон температур, °С	-120...830
Тип преобразователя	Преобразователь теплового потока типа КАЛЬВЕ
Скорость нагрева °С/мин	0,01...30
Разрешение, мкВт	0,4
Погрешность, %	<1
Воспроизводимость, °С	±0,1

Таким образом, для изучения сырьевых материалов, композиционных вяжущих, пены, золошлаковых отходов, а также конечного продукта в виде пеноцеолитбетона были использованы традиционные методы оценки физико-механических свойств, а также современные физико-химические методы исследования материалов с использованием высокоточного оборудования.

## 2.2. Применяемые материалы

Для получения композиционного вяжущего в рамках диссертационного исследования применяли портландцементный клинкер производства АО «Якутцемент» (пгт. Мохсоголлох), производство которого сосредоточено в Хангаласском улусе Республики Саха (Якутия) в 94 км от столицы региона – г. Якутск. Химический и минералогический состав цементного клинкера приведены в таблицах 2.9, 2.10.

**Таблица 2.9** – Химический состав портландцементного клинкера

Содержание оксидов, %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO <sub>св</sub>
20,95	5,03	3,81	64,94	2,2	2,76	0,7	0,46	0,15

**Таблица 2.10** – Минералогический состав портландцементного клинкера

Минералогический состав, %			
$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$
65,96	10,3	6,87	1,58

Физико-механические свойства портландцемента ЦЕМ I 42,5Н (АО «Якутцемент»), определенные по методике, описанные в таблице 2.5, отражены в таблице 2.11.

**Таблица 2.11** – Свойства портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н (АО «Якутцемент»)

Показатель	Значение
Нормальная густота, %	25
Остаток на сите 008, %	7,0
Равномерность изменения объема, мм	0,11
Сроки схватывания:	
– начало, час-мин	2-35
– окончание, час-мин	3-55
Средняя активность цемента в возрасте 28 суток, МПа	40,95

В качестве кремнеземсодержащего компонента в композиционном вяжущем применялся природный цеолит месторождения Хонгуруу (с. Кемпендяй, Сунтарский улус). Важным фактором использования природного цеолита, в рамках диссертационной работы, также послужили проводимые обязательные мероприятия на территории региона по повышению технологии производств сухих строительных смесей. Химический состав природного цеолита приведен в таблице 2.12

**Таблица 2.12** – Химический состав природного цеолита (месторождение Хонгуруу)

Содержание оксидов, %								
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O+	H <sub>2</sub> O-
65,11	12,16	1,08	2,62	1,88	3,3	0,13	8,89	4,26

Выбор данного компонента обусловлен высокими показателями ежегодной добычи цеолитовых пород, значительными запасами месторождения (около 11,3 млн.т), а также выгодным географическим положением для ряда районов Республики Саха (Якутия).

В качестве заполнителя использовался гранулированный пеноцеолит производства ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар). Производственная линия сосредоточена в с. Устье Сунтарского улуса. Пористый заполнитель удовлетворяет требованиям ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний». Характеристики пористых заполнителей, согласно паспорту производителя, приведены в таблице 2.13.

**Таблица 2.13** – Характеристики гранулированного пеноцеолита ООО «Сунтарцеолит»

Показатель	Значение
Размер зерен, мм	5-20
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	245
Средняя плотность	502
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2020
Пористость, %	87,8
Водопоглощение, % мас.	22,8
Прочность на сдавливание, МПа	0,83

В работе исследовались протеиновые и синтетические пенообразователи торговых марок FoamСem (Италия), ПБ–2000 (Россия), Rospena (Россия), срок годности которых соответствовал установленным срокам и не был превышен на момент проведения исследований. С их помощью приготавливался раствор для дальнейшего вспенивания лабораторным пеногенератором. Технические характеристики пенообразователей приведены в таблице 2.14.

**Таблица 2.14** – Технические характеристики пенообразователей

Показатель	Пенообразователь		
	FoamСem	ПБ-2000	Rospena
Страна производитель	Италия	Россия	Россия
Тип	протеиновый	синтетический	Протеиновый
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1140–1200	1000–1200	1000–1100
Водородный показатель, рН	6,7±0,3	7,0±1,0	6,7±0,3

В работе применялась водопроводно-питьевая вода, которая подается с водоочистой станции (водоузел №1) АО «Водоканал» (г. Якутск) по системе водоснабжения города. По данным АО «Водоканал», водородный показатель воды составляет рН=7,62±0,20, жесткость–3,18±0,48 ммоль/дм<sup>3</sup>, цветность–5,3°, мутность–0,05 мг/дм<sup>3</sup>, содержание железа–0,05 мг/дм<sup>3</sup>. Вода удовлетворяет по предельно-допустимым концентрациям СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», а также ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов».

В работе использовались золошлаковые отходы, образованные при совместном удалении золы и шлака механическим способом в процессе сжигания бурого угля ООО «Якутский котловой завод». Характеристики золошлаковых смесей приведены в таблицах 2.15, 2.16.

**Таблица 2.15** – Технические характеристики золошлаковых отходов (ООО «Якутский котловой завод»)

Показатель	Значение
Вид ЗШС по виду сжигаемого угля	Буроугольный (Б)
Вид ЗШС по химическому составу смесей	Основные (О)
Вид ЗШС по способу удаления в золоотвал	Сухой (С)
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1028
Модуль крупности, М <sub>к</sub>	0,789
Зольная составляющая, частицы золы и шлака размером менее 0,315 мм	84,2
Шлаковая составляющая, частицы зерна шлака размером от 0,315 мм до 5 мм	15,8
Вяжущая активность АМД R, МПа, не менее	4,5
Количество СаО, поглощенного АМД из насыщенного раствора гидроксида кальция, мг СаО/ г АМД	30,3
Потеря массы при прокаливании, %	16,3
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	175
Остаток на сите № 008, %	20,4

**Таблица 2.16**– Химический состав золошлаковых отходов (ООО «Якутский котловой завод»)

Содержание оксидов, %													
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>
35,04	0,69	14,96	3,63	1,71	0,02	3,61	20,83	2,57	0,13	0,71	0	0,03	6,22

Таким образом, для разработки легкого бетона на композиционном вяжущем в качестве сырьевых компонентов использованы: портландцемент производства АО «Якутцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н (пгт. Мохсоголлох), природный цеолит месторождения Хонгуруу (с. Кемпендяй), пористый заполнитель – пеноцеолит (с. Устье), производства ООО «Сунтарцеолит», золошлаковые отходы котлового завода ООО «Якутский котловой завод» (г.

Якутск), пенообразователи ПБ-2000 (Россия), Rospena (Россия), FoamСem (Италия). Представленные материалы являются наиболее эффективными в рамках технологии получения конечного продукта в условиях современных научных изысканий, которые соответствуют требованиям нормативной документации.

### **2.3. Выводы по главе 2**

1. Для изучения сырьевых материалов, композиционных вяжущих, пены, золошлаковых отходов, а также конечного продукта в виде пеноцеолитбетона были использованы традиционные методы оценки физико-механических свойств, а также современные физико-химические методы исследования материалов с использованием высокоточного оборудования.

2. Для разработки легкого бетона на композиционном вяжущем в качестве сырьевых компонентов использованы: портландцемент производства АО «Якутцемент» марки ЦЕМ I 42,5Н (пгт. Мохсоголлох), природный цеолит месторождения Хонгуруу (с. Кемпендяй), пористый заполнитель – пеноцеолит (с. Устье), производства ООО «Сунтарцеолит», золошлаковые отходы котлового завода ООО «Якутский котловой завод» (г. Якутск), пенообразователи ПБ-2000 (Россия), Rospena (Россия), FoamСem (Италия). Представленные материалы являются наиболее эффективными в рамках технологии получения конечного продукта в условиях современных научных изысканий, которые соответствуют требованиям нормативной документации.

## 3 ОЦЕНКА ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА КАК КОМПОНЕНТА КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

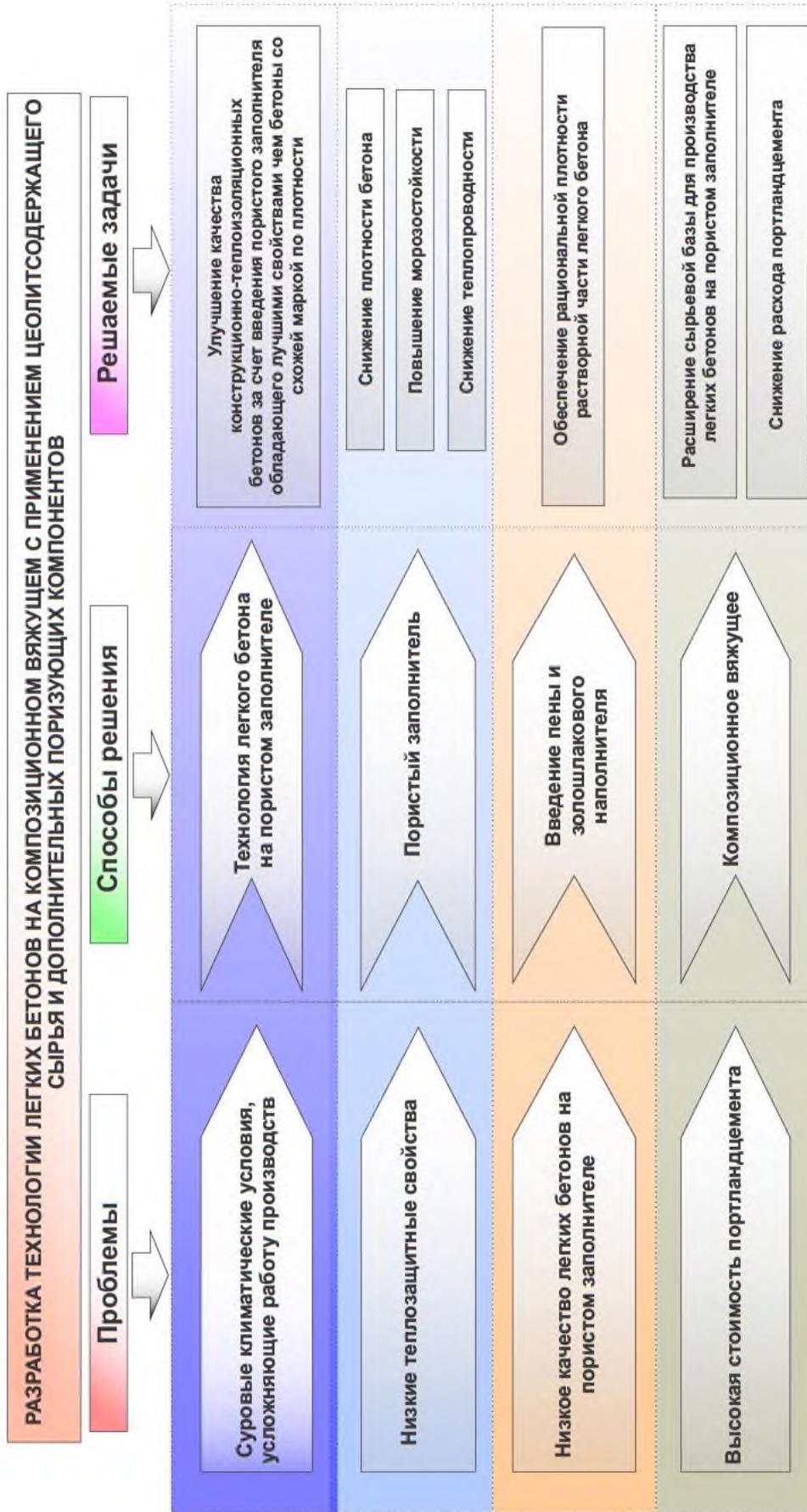
### 3.1. Дизайн проведения исследования

По результатам литературного обзора современных исследований и практического опыта в области производства легких бетонов на пористых заполнителях позволил систематизировать ключевые проблемы и сформулировать основные направления для их решения (рисунок 3.1). Реализация данных направлений направлена на повышение качества конструкционно-теплоизоляционных бетонов с использованием местного сырья.

В условиях Республики Саха (Якутия) к числу наиболее значимых проблем относятся высокая стоимость портландцемента, обусловленная сложной логистикой; значительная удаленность и рассредоточенность населенных пунктов; суровые природно-климатические условия, осложняющие производственные процессы; низкая прочность легких бетонов на пористых заполнителях. Решением данных проблем является разработка эффективного композиционного вяжущего, применение которого позволит сократить расход портландцемента в разрабатываемом изделии, а также расширить региональную сырьевую базу за счет применения местного минерального сырья.

Рациональное снижение плотности растворной части является решением проблемы повышения теплотехнических свойств легкого бетона, которая достигается не только поризацией пеноагентом, но и введением компонентов, обеспечивающих рациональную пористость цементной матрицы.

Таким образом, *научной гипотезой* исследования в рамках данной диссертационной работы стало предположение о том, что повышение эффективности технологии производства легкого бетона возможно за счет применения композиционного вяжущего, полученного с использованием природного цеолита алюмосиликатного состава, что позволит сократить расход цемента, и введения пенообразователя и золошлакового наполнителя для обеспечения рациональной плотности растворной части.



**Рисунок 3.1** – Проблемы и способы повышения эффективности технологии производства легкого бетона на композиционном вяжущем

Для экспериментальной верификации научной гипотезы был разработан поэтапный дизайн эксперимента (рисунок 3.2). Объектом исследования в диссертационной работе является легкий бетон на композиционном вяжущем с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу Сунтарского района Республики Саха (Якутия) на пористом заполнителе – пеноцеолите производства ООО «Сунтарцеолит» и с дополнительными компонентами для снижения плотности цементной матрицы (поризации) в виде пены и золошлакового отхода. Декомпозиция диссертационной работы представлена в пять этапов.

Первым этапом является оценка природного цеолита месторождения Хонгуруу как компонента композиционного вяжущего. Для этого были изучены: основные технические свойства природного цеолита, химический и минералогические составы, характер микроструктуры и размолоспособность частиц природного цеолита; свойства тонкомолотого природного цеолита: гранулометрический состав, влияние тонкомолотого природного цеолита на морозостойкость цементного камня, микроструктуру частиц, активность природного цеолита по отношению к СаО, коэффициент качества как компонента композиционного вяжущего.

Показатель коэффициента качества, методика определения которого была разработана учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова, позволяет ранжировать с точки зрения применимости и эффективности минеральный компонент породы как компонент композиционного вяжущего в широком спектре техногенного сырья, сформировавшегося как на территории Российской Федерации, так и за ее пределами.

Следующим этапом работы являлось разработка составов композиционных вяжущих и оценка их свойств. Авторы [157] в ходе проведенных научных исследований влияния природных цеолитов на свойства бетонов пришли к тому, что существует определенный диапазон, равный 20–25% от массы вяжущего, который приводит к получению оптимального состава бетона.

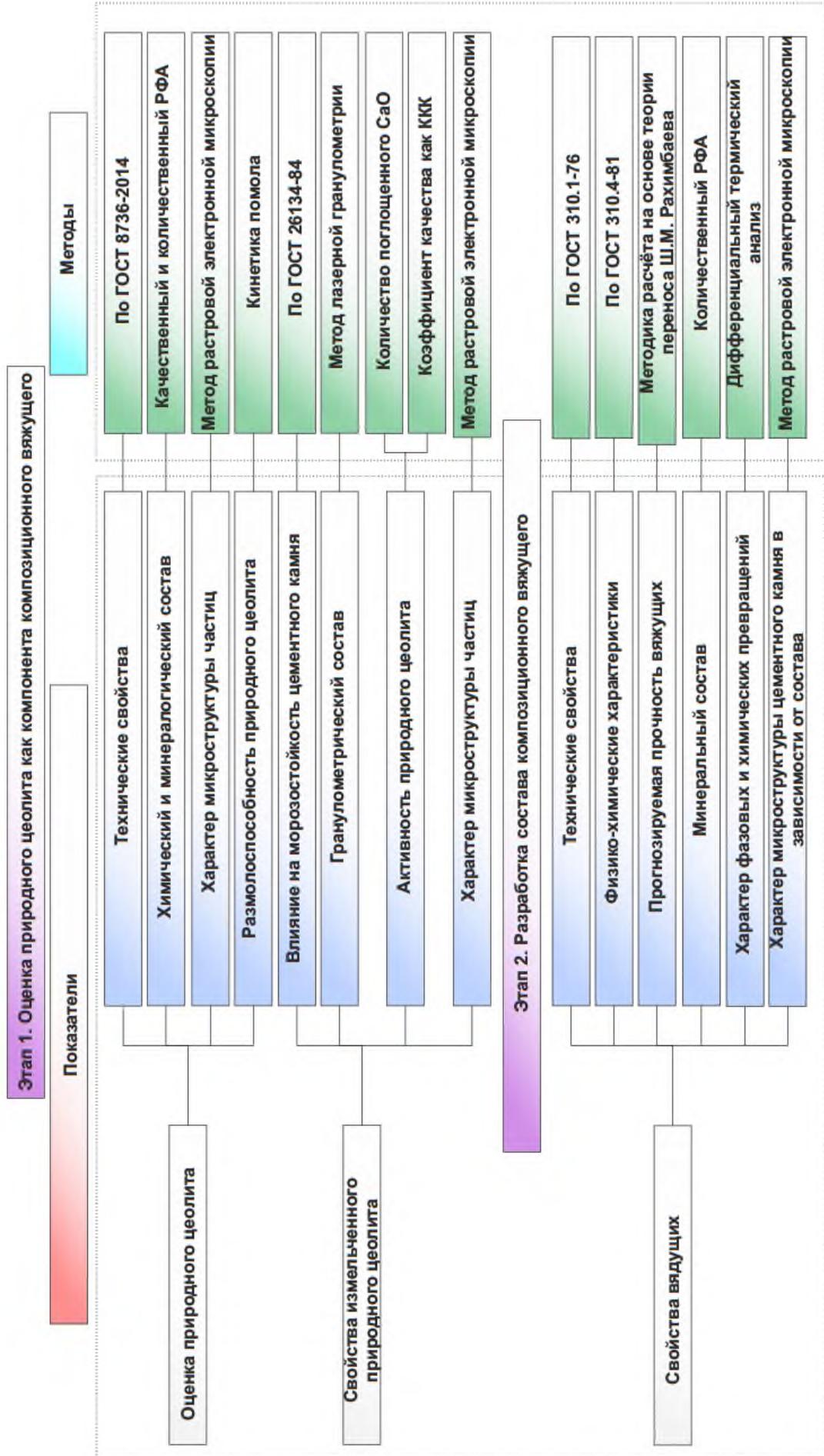
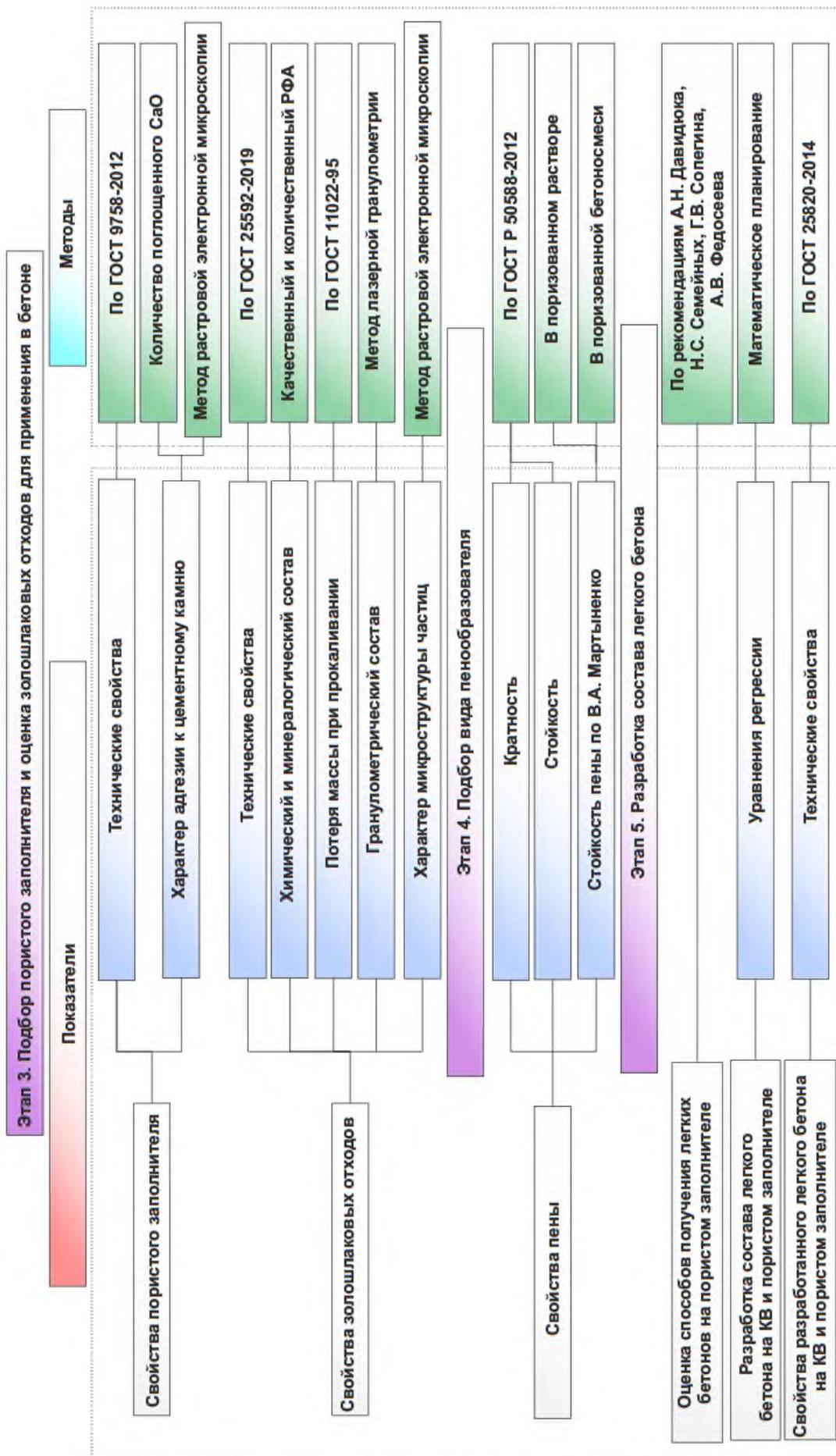


Рисунок 3.2 – Декомпозиция дизайна проведения исследования



Для оценки исследуемых композиционных вяжущих, а именно ТМЦ–70, ТМЦ–85, ЦЕМ I 42,5Н, изучались их физико-механические показатели в зависимости от сроков твердения, а также физико-химические процессы вяжущих с применением современных методов изучения структуры и свойств. В работе для прогнозирования прочности разрабатываемых вяжущих использована методика, основанная на теории переноса Ш.М. Рахимбаева. Минералогический состав определялся методом количественного рентгенофазового анализа. Далее для выявления температурных диапазонов фазовых превращений проведен дифференциальный термический анализ. Оценка микроструктурных особенностей композиционных вяжущих производилась на основе микроснимков, полученных методом растровой электронной микроскопии.

Третьим этапом исследования является изучение технических свойств пористого заполнителя и золошлакового отхода, а также оценка характера адгезии к цементному камню. Основные технические характеристики пористого заполнителя определялись в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний»

Оценку характера адгезии пористого заполнителя к цементному камню определяли методом по количеству поглощенного СаО. Контактная зона «пористый заполнитель – цементный камень» оценивалась с применением растровой электронной микроскопии. Далее оценивались физико-химические свойства золошлаковых отходов на основе методик, описанных в нормативных документах, а также расширенных методов анализа. Для определения фазового состава, морфологических особенностей и количества содержащихся минералов был выполнен рентгенофазовый анализ.

Следующим этапом производится подбор пенообразователя на основе оценки его свойств: кратность, стойкость пены во времени, стойкость пены в растворе и в легком бетоне, стоимость. В данной работе выбор пенообразователей торговых марок Rospena, FoamCEM, ПБ–2000 обусловлен

по критериям: опыт применения для производства пенобетонов, стоимость продукции и доступность на рынке, страна производитель.

На заключительном этапе исследования производится подбор рационального состава легкого бетона на композиционном вяжущем и пористом заполнителе с помощью метода математического планирования, в качестве варьируемых компонентов которых являлись объемная концентрация пористого заполнителя и плотность цементной матрицы.

Таким образом, разработанный дизайн эксперимента основан на комплексном анализе системы «состав – структура – свойства» и включает в себя 5 основных этапов: оценка природного цеолита месторождения Хонгуруу как компонента композиционного вяжущего; разработка состава композиционного вяжущего; подбор пористого заполнителя и золошлакового отхода; подбор вида пенообразователя; разработка состава легкого бетона на композиционном вяжущем и пористом заполнителе. Созданная сегментированная декомпозиция дизайна исследования по разработке легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита позволяет эффективно управлять исследовательским процессом при решении задач с минимальными трудозатратами.

### **3.2. Изучение качества природного цеолита как компонента композиционного вяжущего**

В рамках данного диссертационного исследования применены методики изучения используемого сырья и принципов получения композиционных вяжущих систем, которые на сегодняшний день наиболее актуальны в современных научных исследованиях.

В качестве кремнеземсодержащего компонента в диссертационной работе был использован природный цеолит месторождения Хонгуруу (Россия, с. Кемпендяй), используемый на данный момент в качестве: кормовой добавки для КРС и птиц, фильтра для очистки питьевой воды, присыпки для предотвращения гниения овощей и картофеля при хранении, туалетной

подстилки для домашних животных, дезодоранта для сушки обуви и холодильников. Поэтому было проведено исследование сырья, с целью определения возможности применения для строительной индустрии и установления качества как компонента КВ. Также в качестве компонента КВ рассмотрен отход производства пористого заполнителя из природного цеолита предприятия ООО «Сунтарцеолит».

Исследуемый природный цеолит представлен в виде дробленых зерен неправильной формы светло-серого цвета с шероховатой, слегка пористой, поверхностью. Так как природный цеолит рассматривается как компонент композиционного вяжущего взамен природных песков проведена предварительная подготовка цеолита в виде дробления до размера зерен 0–5 мм. Модуль крупности равен 3,45, пустотность 46,6% (таблица 3.1), насыпная плотность составляет 1020 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность составляет 2625 кг/м<sup>3</sup> (таблица 3.2).

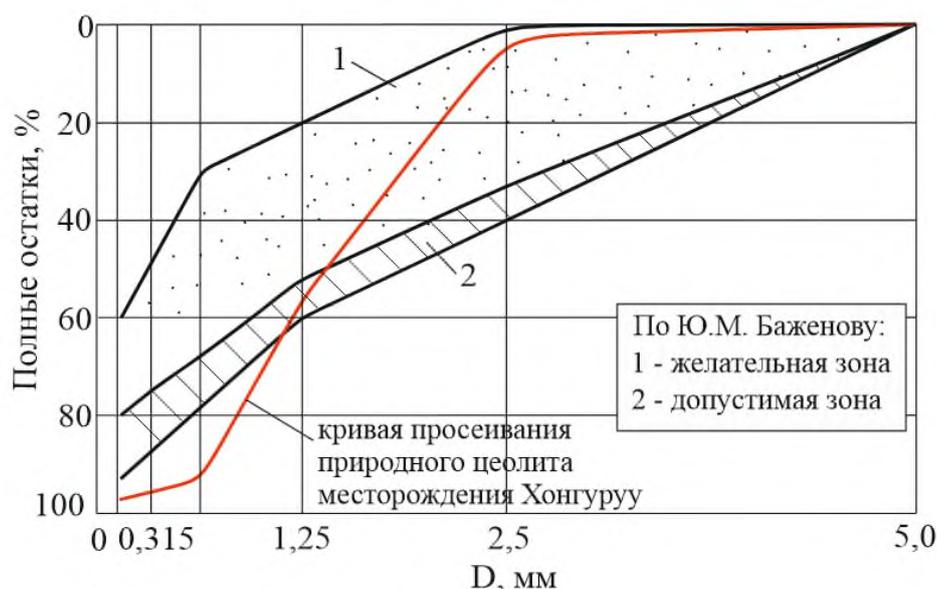
**Таблица 3.1** – Зерновой состав природного цеолита месторождения Хонгуруу

Остатки на сите, %	Размер фракций, мм						M <sub>к</sub>	Пустотность, %
	5-2,5	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,14	<0,14		
Частные	2,4	54	36,7	2,8	1,3	2,8	3,45	46,6
Полные	2,4	56,4	93,1	95,9	97,2	100		

**Таблица 3.2** – Физико-механические характеристики природного цеолита

Вид сырья	Размер зерен, мм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Водопоглощение, %
Природный цеолит	0–5	1660	2730	30	31,9

Результаты просеивания методом ситования показывают, что зерновой состав природного цеолита в большей степени попадает в оптимальную область песков, допускаемых для бетонов (рисунок 3.3). Основываясь на полученном значении модуля крупности, природные цеолиты относятся к группе повышенной крупности песков, а также по содержанию зерен, крупностью св. 10, 5 и менее 0,16 мм, к категории песков I класса по ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».



**Рисунок 3.3** – Зерновой состав природного цеолита

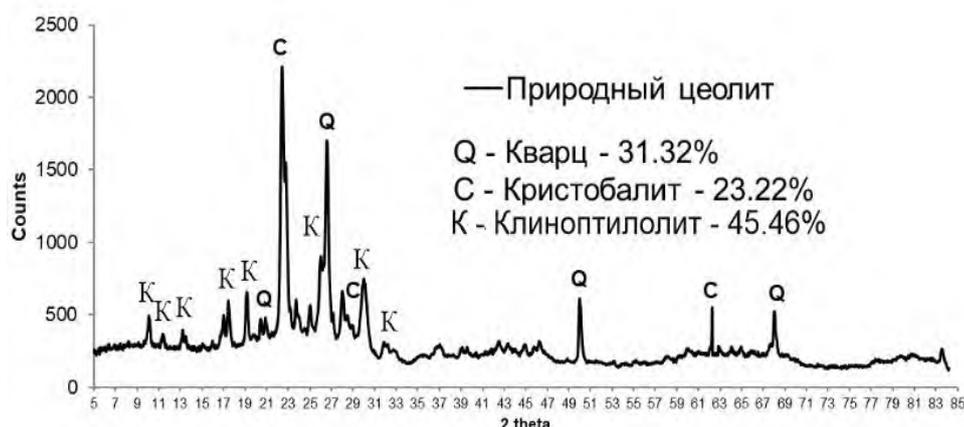
Согласно данным химического анализа (таблица 3.3), основными соединениями в природном цеолите являются оксид кремния  $\text{SiO}_2$  и оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что коррелирует с известным соотношением цеолитов к алюмосиликатам.

**Таблица 3.3** – Химический состав природного цеолита месторождения Хонгуруу

Оксиды	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}+$	$\text{H}_2\text{O}-$
Содержание, %	65,11	12,16	1,08	2,62	1,88	3,3	0,13	8,89	4,26

Исследование и анализ микроструктурных особенностей исходного сырья и морфологии поверхности его частиц проводилось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM-7800F с использованием супергидридной объективной линзы (СОЛ) в учебно-научно-технологической лаборатории «Технологии полимерных нанокompозитов» в Северо-Восточном федеральном университете им М.К. Аммосова.

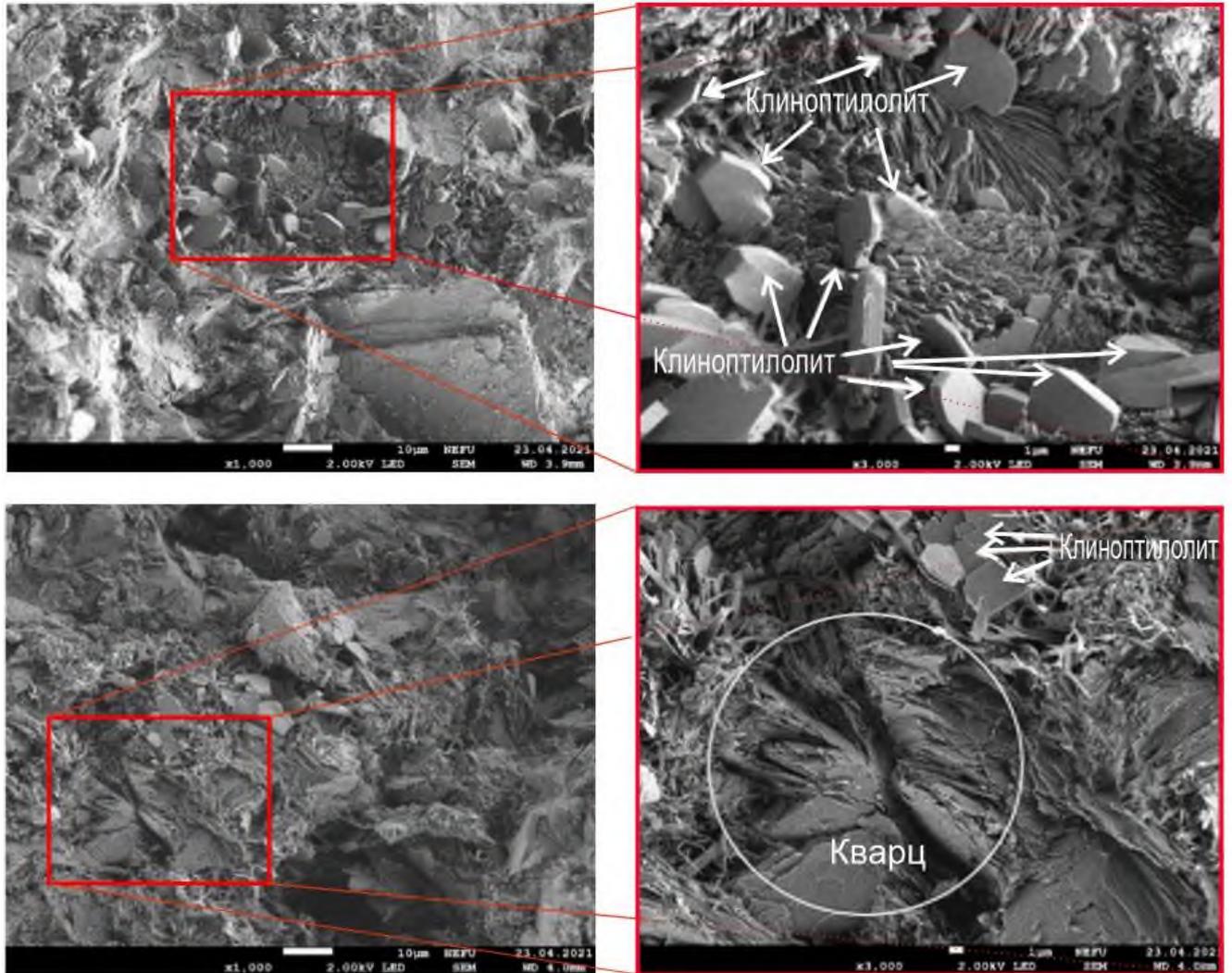
Анализ минералогического состава, выполненного с помощью рентгенофазового анализа, говорит о том, что кристаллическая составляющая исходного природного цеолита характеризуется наличием отражений клиноптилолита (минерал группы цеолитов), содержание которого составляет порядка 45% (рисунок 3.4), кварца – 31% и кристобалита – 23%.



**Рисунок 3.4** – Минералогический состав природного цеолита месторождения Хонгуруу

Рентгенофазовый анализ подтверждается данными растровой электронной микроскопии. Клиноптилолит представлен в виде хорошо ограненных пластинчатых кристаллов с совершенной спайностью и таблитчатым габитусом. Помимо этого, микроструктура цеолита характеризуется наличием частиц с раковистым изломом, чешуйчато-зернистыми и игольчатыми агрегатами, что говорит о высокой степени полиминеральности породы и некоторой разобщенности и рыхлости (рисунок 3.5). что свидетельствует о ее полиминеральности. Наблюдаются агрегаты

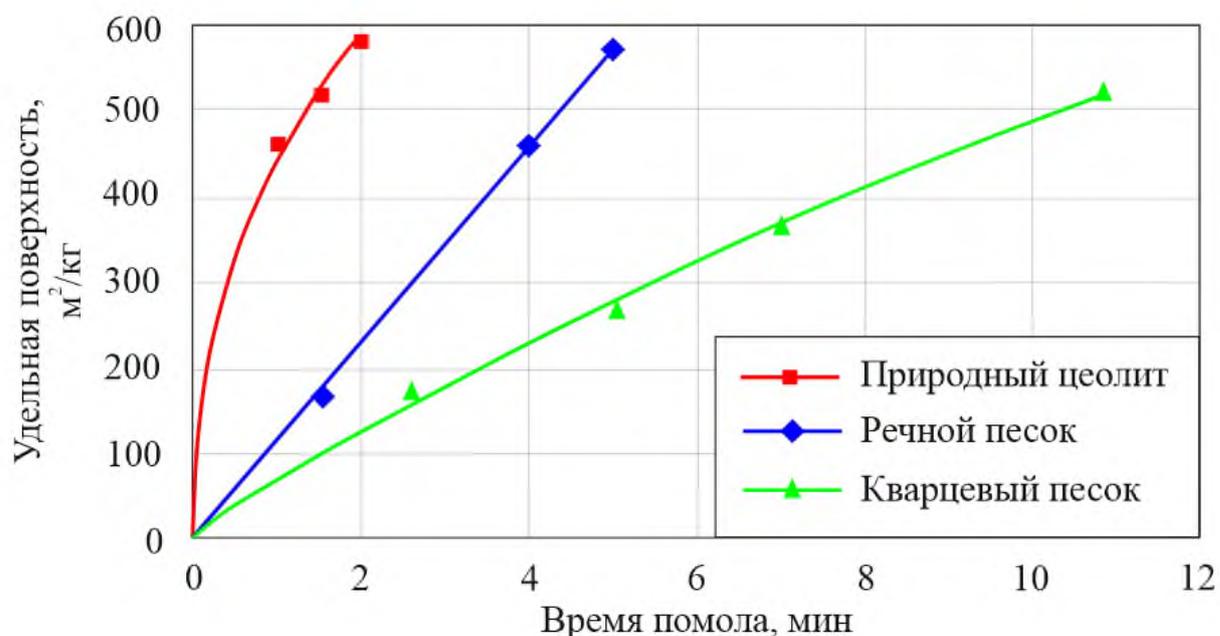
различных размеров и морфологии. Отмечаются чешуйчато-зернистые образования, агрегаты игольчатых кристаллов, а также хорошо ограненные таблитчатые кристаллы с совершенной спайностью [194].



**Рисунок 3.5** – Микроструктура природного цеолита

Ряд исследований [195-197] описывает целесообразность изучения размолоспособности кварцсодержащих добавок, применяемых для производства КВ. Показатель размолоспособности природного цеолита определяется в сравнении с широко применяемым кварцевым песком, который является эталоном размолоспособности в производстве тонкомолотых строительных материалов [198], а также с наиболее распространенным на территории Якутии кварц-полевошпатовым песком Ленского бассейна. Так для

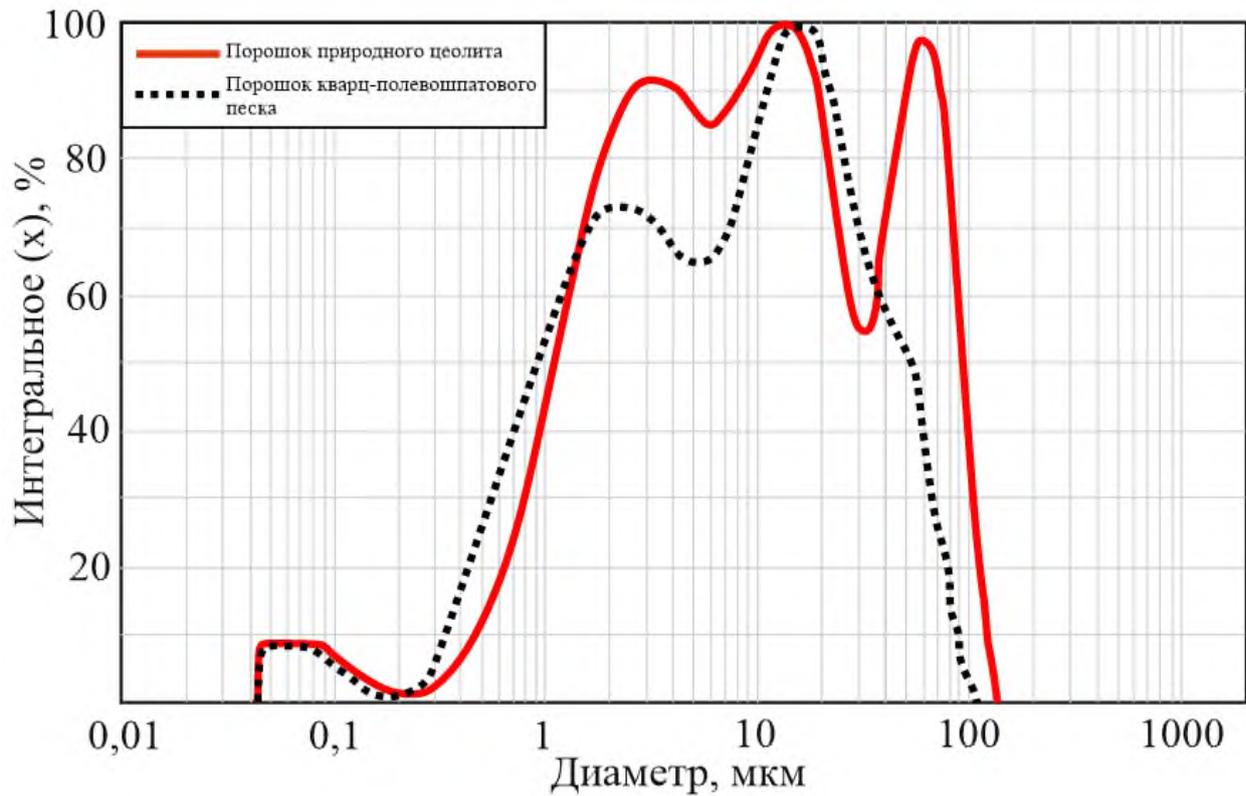
начала проводилось измельчение материалов до удельной поверхности 500 м<sup>2</sup>/кг. Показано, что размолоспособность природного цеолита в 2 раза выше, чем у полиминерального речного песка и более чем в 5 раз выше, чем у кварцевого песка (рисунок 3.6). Полиминеральный состав природного цеолита предопределяет его более высокую размолоспособность, что связано с совершенной спайностью и хрупкостью одного из породообразующих минералов – клиноптилолита, а также полиминеральностью породы в целом. Данный факт согласуются с работами исследователей БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород) в которых говорится, что полиминеральный состав пород обладает лучшей размолоспособностью, так как быстро измельчаемая слабая порода выступает в дальнейшем в качестве расклинивателя при измельчении частиц более твердых минералов.



**Рисунок 3.6** – Зависимость значения удельной поверхности от времени помола

Результаты гранулометрического анализа представлены на рисунке 3.7. Как видно из полученных графиков, распределение частиц у порошка цеолита с удельной поверхностью 520–550 м<sup>2</sup>/кг, что и у кварц-полевошпатового песка, характеризуется наличием трех выраженных пиков в области размеров 3,15 и 65 мкм. В отличие от них, кривая распределения у речного песка

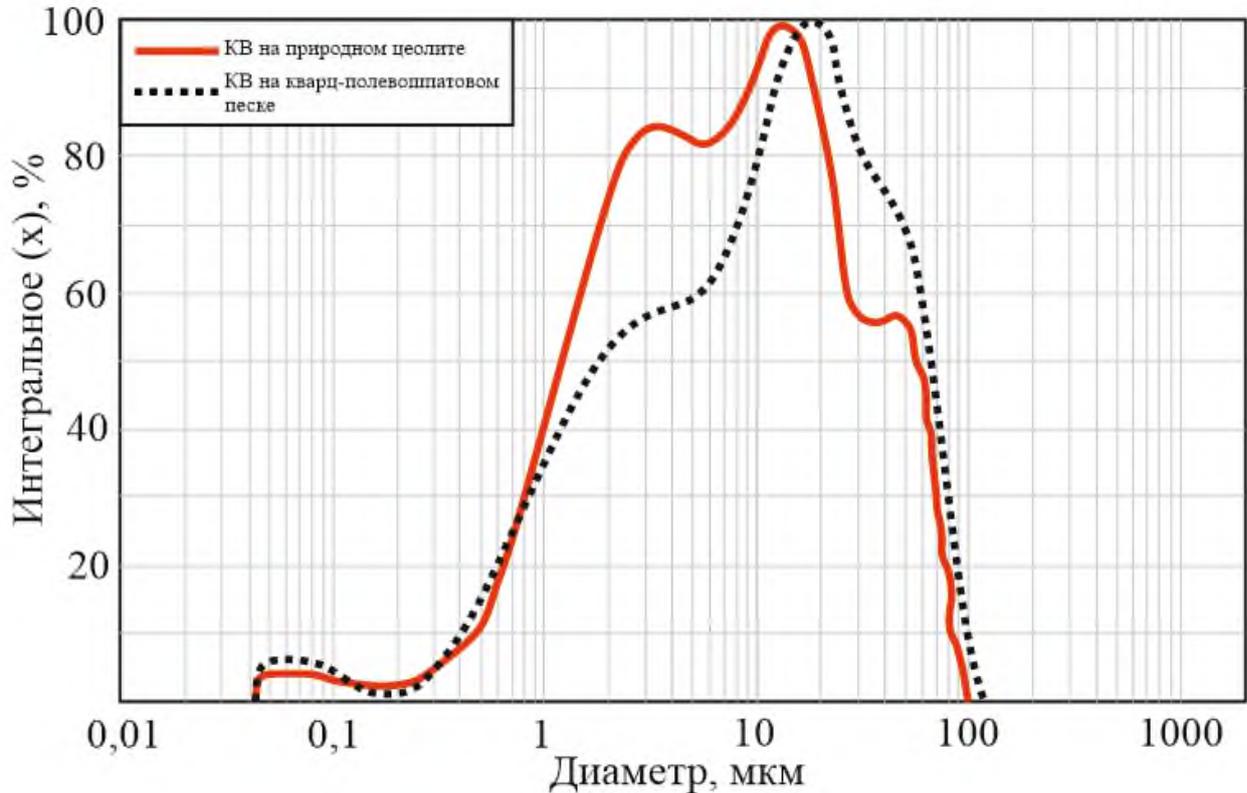
характеризуется двумя пиками в области размеров частиц 2, 17 мкм и плато в области от 30 до 50 мкм. Таким образом при помоле природного цеолита образуется полифракционный порошок характеризуемый повышенной модальностью, а также размахом частиц  $((d_{90}-d_{10})/d_{50})$  составляющим 6,87 мкм по сравнению с получаемыми порошками из речного кварц-полевошпатового песка с размахом частиц 4,99 мкм.



**Рисунок 3.7** – Гранулометрия измельченных порошков в зависимости от состава

Второй этап помола (рисунок 3.8) природного цеолита до удельной поверхности до  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$  с добавлением цемента также характеризуется получением более полифракционного порошка вяжущего почти с теми же тремя пиками в области размеров 3, 15 и 50 мкм, в отличие от аналогичного помола речного песка у которого наблюдается уже один пик в области размеров частиц 15 мкм и двумя плато в области 2–3 мкм и 30–50 мкм. Таким образом сухая смесь полученного композиционного вяжущего с использованием природного цеолита характеризуется полифракционным составом повышенной

модальности, а также повышенным размахом частиц  $((d_{90}-d_{10})/d_{50})$  составляющим 5,25 мкм по сравнению с сухой смесью композиционного вяжущего с использованием речного кварц-полевошпатового песка с размахом частиц 4,16 мкм.



**Рисунок 3.8** – Гранулометрия измельченных КВ в зависимости от состава

Для подтверждения возможности использования природного цеолита как компонента композиционного вяжущего также проведены испытания по определению их сорбционной способности по отношению к СаО в измельчённом виде. Активность определялась по методу Запорожца [190]. Испытание проводилось с помощью титрования соляной кислотой для определения концентрации СаО, исходного известкового раствора, приготовленного из расчета 1,05–1,15 г СаО на литр и известкового раствора, в котором было выдержано изучаемое сырьё в течении 24 ч. Из результатов определения активности поверхности различных видов сырья видно, что природный цеолит имеет большее значение поглощенного СаО по сравнению с

испытываемыми песками (таблица 3.4). Чем больше активная минеральная добавка поглощает СаО из раствора, тем выше оценивается ее активность [199].

**Таблица 3.4** – Свойства изучаемого сырья как компонента композиционных вяжущих

Вид сырья	Количество поглощенного СаО, мг/г	Активность ТМЦ–50, МПа	Коэффициент качества
<b>Природный цеолит</b>	<b>76,6</b>	<b>40,1</b>	<b>1,16</b>
Стандартный монофракционный песок	58,9	34,7	1
Кварц-полевошпатовый песок Ленского бассейна	31,1	33,5	0,97

Оценка качества песков для получения композиционных вяжущих, показала, что активность ТМЦ–50 на природном цеолите на 13,5% выше по сравнению с аналогичным композиционным вяжущем на стандартном монофракционном песке, что и коррелируется с цифрами количества поглощенного СаО (таблица 3.5).

**Таблица 3.5** – Сравнительная характеристика кремнезёмистого сырья как компонента композиционного вяжущего

№ п/п	Наименование кремнезёмистого компонента в составе ТМЦ	Коэффициент качества
1	Отсев дробления кварцитопесчаника Лебединского ГОКа	1,29
2	Вулканический пепел аморфизированный (Республика Эквадор)	1,29
3	Вулканический пепел (Республика Эквадор)	1,25
<b>4</b>	<b>Природный цеолит месторождения Хонгуруу</b>	<b>1,16</b>
5	Вулканический пепел кристаллический (Республика Эквадор)	1,05
6	Вулканический туф (Остров Сицилия)	1,05
7	Песок Стодереvского карьера	1,02

№ п/п	Наименование кремнеземистого компонента в составе ТМЦ	Коэффициент качества
8	Отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов КМА	1,02
9	Песок Вольского месторождения	1
10	Песок кварцевый фракционированный (ГОСТ 6139-2003)	1
11	Вулканогенные осадочные породы (вулкан Жировский)	0,96
12	Кварц-полевошпатовый песок Ленского бассейна	0,94
13	Отходы мокрой магнитной сепарации Ковдорского месторождения	0,92
14	Песок Нижне-Ольшанского месторождения	0,86
15	Песок Эского месторождения	0,86
16	Песок Корочанского месторождения	0,84
17	Отсев Солдато-Александровского карьера	0,77
18	Песок Вяземского месторождения	0,62
19	Песок Махневского месторождения	0,62
20	Отходы алмазообогащения ЮАР	0,40
21	Отходы алмазообогащения Архангельской алмазоносной провинции	0,31

На основании полученных данных, представленных в таблице 3.5, установлена возможность применения природного цеолита месторождения Хонгуруу в составе композиционных вяжущих в роли кремнеземистого компонента. Это подтверждается полученным коэффициентом качества цеолита, равным  $K_k=1,16$ , что выше, чем у кварцевых песков.

Таким образом, доказана эффективность природного цеолита месторождения Хонгуруу, как компонента композиционного вяжущего. Данный вид материала характеризуется полидисперсным составом благодаря составу материнских горных пород. Микроструктура цеолита характеризуется наличием частиц с раковистым изломом, чешуйчато-зернистыми и игольчатыми агрегатами, что говорит о высокой степени полиминеральности породы и некоторой разобщённости и рыхлости. Строение цеолита в совокупности с низкой твердостью преобладающего в породе минерала –

клиноптилолита, высокой истинной плотностью, низкой средней плотностью высокой пористостью обеспечивает высокую размолоспособность на первой стадии помола, для сравнения она примерно в 2 раза выше, чем у полиминерального речного песка и более чем в 5 раз выше, чем у кварцевого песка. Гранулометрический состав ТПЦ, а также КВ на его основе, характеризуется полифракционным распределением частиц с наибольшими выраженными пиками в области размеров: для ТПЦ – 3, 15 и 65 мкм; для КВ с применением ТПЦ на портландцементе – 3, 5 и 15 мкм. Высокая активность природного цеолита обусловлена его полиминеральным составом, распределением частиц по размерам и особенностями их формы, которые определяют высокую активность по отношению к СаО и, как следствие, обеспечивают высокий показатель коэффициента качества как компонента композиционного вяжущего.

### **3.3. Изучение влияния добавки природного цеолита на морозостойкость цементного камня**

Признанный факт, что природные цеолита ввиду повышенной пористости сочетают в себе свойства адсорбента и «молекулярного сита», что позволяет применять их в разных областях промышленности. Многими исследователями рекомендуется применение природных цеолитов в качестве активной минеральной добавки [200-203]. Данные добавки за счет алюмосиликатного состава активно взаимодействуют с цементными минералами давая «пуццолановый эффект». Однако в этих работах акцентируется внимание на повышение активности, но недостаточно уделено внимания влиянию микропористости – на не менее важную характеристику бетонов как морозостойкость.

На данном этапе были проведены исследования по изучению изменения прочности лабораторных образцов, определяемая методом ультразвукового контроля, во время циклов замораживания-оттаивания

Для проведения испытаний применялись портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства АО «Якутцемент» (пгт. Мохсоголох, Россия).

Образцы из портландцемента с пуццолановой добавкой в количестве 10, 30 и 50 % (взамен цемента по массе) изготавливались в виде кубов 70x70x70 мм без применения крупных и мелких заполнителей согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 10180-2012 "Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам". Число образцов в серии составляло 3 штуки. Все образцы в серии изготавливались из одной пробы цементной смеси, с одинаковыми условиями формования и твердения. После окончания твердения все образцы испытывают в одном возрасте.

Образцы, твердеющие в нормальных условиях, находятся в формах до распалубки. Формы защищают от высыхания влажной тканью, а сами образцы выдерживают при температуре внутреннего воздуха  $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ . После распалубливания образцы помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха  $(95\pm 5)\%$ .

Перед испытаниями образцы были выдержаны в течение 4 часов при температуре  $(20\pm 5)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха не менее 55%.

Измерение прочности полученных цементных камней производилось при помощи ультразвукового прибора для контроля прочности бетона «Пульсар-2.1» методом сквозного прозвучивания, согласно межгосударственного стандарта ГОСТ 17624-2021 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

Перед началом испытания образцов производилось установление градуировочной зависимости «время распространения ультразвука – прочность» на основе серии образцов каждого состава вяжущего. Градуировочная зависимость устанавливается согласно формуле 3.2 для образцов на 28 день твердения.

$$R = a_1 \cdot t + a_0 \quad (3.2)$$

где,  $R$  – прочность образца согласно ультразвуковому измерению, МПа;

$t$  – время распространения ультразвука согласно ультразвуковому измерению, мкс;

$a_1$  и  $a_0$  – градуировочные коэффициенты, определяемые согласно формулам 3.3 и 3.4.

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{R}_f - R_{jf})(\bar{t} - t_j)}{\sum_{j=1}^N (\bar{t} - t_j)^2} \quad (3.3)$$

$$a_0 = \bar{R}_f - a_1 \cdot \bar{t} \quad (3.4)$$

где,  $N$  – количество образцов в серии;

$\bar{R}_f$  – средняя фактическая прочность на сжатие образцов в  $N$  серии образцов, МПа;

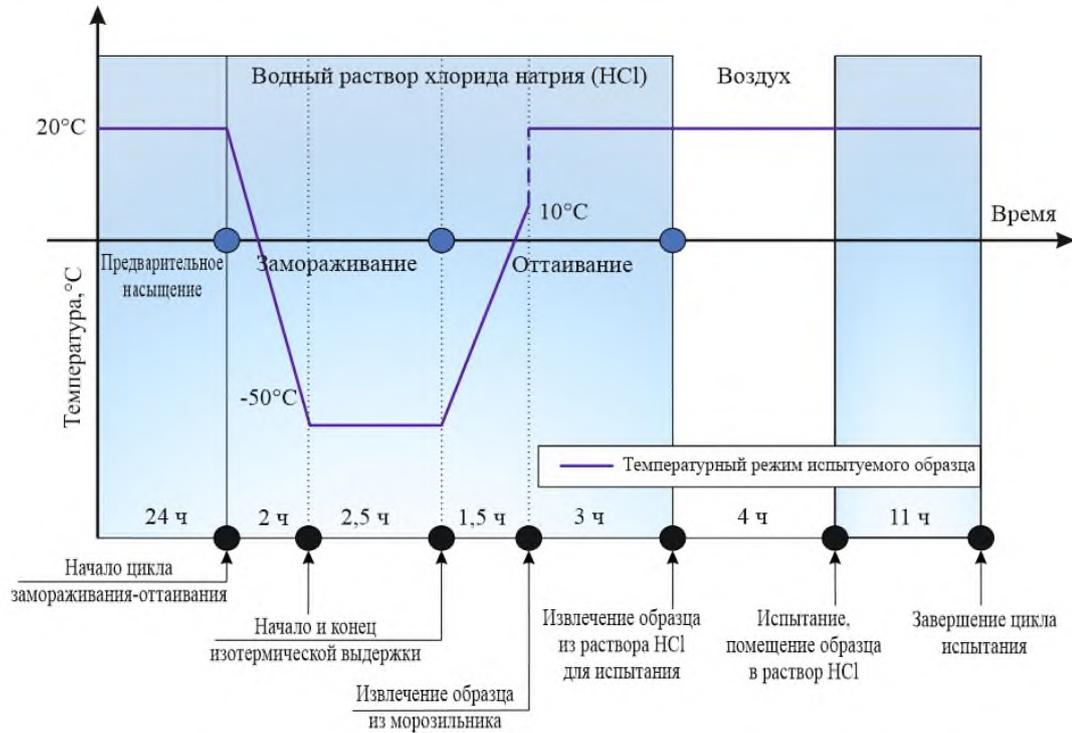
$\bar{t}$  – среднее время распространения ультразвука в  $N$  серии образцов, мкс;

$R_{jf}$  и  $t_j$  – единичное значение прочности и времени распространения ультразвука для  $j$  образца в серии.

Определение морозостойкости образцов цементного камня производилось согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 26134-2016 "Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости" в соответствии с приложением Д (справочное). Один цикл замораживания-оттаивания образцов соответствовал замораживанию в закрытых емкостях, наполненных 5%-ным водным раствором хлорида натрия при температуре  $-50$  °С в течении 2,5 часов и последующим оттаиванием в течении 2,5 часов при температуре  $+20$  °С после чего производилось измерение времени распространения ультразвука (рисунок 3.9). Характеристики приготовленных образцов представлены в таблице 3.6.

С увеличением добавки ТМЦ в состав цементного камня наблюдается снижение средней плотности лабораторных образцов и значения водопоглощения. Снижение уровня портландцементного клинкера в составах образцов приводит к снижению прочности образцов на 28 суток. Это объясняется поздним проявление пуццолановой активности минералов природного цеолита. Также это подтверждается в работах ученых из Болгарской академии наук, которые выявили уменьшение объема пор в образцах между 28 и 180 сутками твердения вследствие образования дополнительных гидратных новообразований [204]. Помимо этого, турецкие

исследователи *B. Uzal, L. Turanli*, обнаружили с помощью аналитического метода элементного анализа твердого вещества (EDX) непрореагировавшие минералы цеолитов, причем также говорится о том, что: «значительный вклад пуццоланового эффекта в прочности цементных камней достигается при крупных дозировках добавки из природного цеолита» [205].



**Рисунок 3.9** – Принципиальная схема определения морозостойкости образцов цементного камня

**Таблица 3.6** – Физико-механических характеристик образцов цементного камня различного состава

Состав вяжущего	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Естественная влажность, %	Водопоглощение, %	Средняя прочность на сжатие, МПа
Портландцемент (ПЦ)	2093	2,7	4,4	32,7
90% ПЦ 10% ТПЦ	2017	2,9	5,8	29,9
70% ПЦ 30% ТПЦ	1883	3,6	7,7	24,2
50% ПЦ 50% ТПЦ	1875	3,6	8,1	23,4

Определение калибровочных коэффициентов  $a_1$  и  $a_0$ , найденных по формулам (3.3) и (3.4), позволили установить линейную зависимость между прочностью на сжатие и временем распространения ультразвука. Следует отметить, что достоверность аппроксимации  $R^2=0,87$  является удовлетворительной, но не высокой, что объясняется ограниченным объемом выборки и применением линейной модели для ее описания.

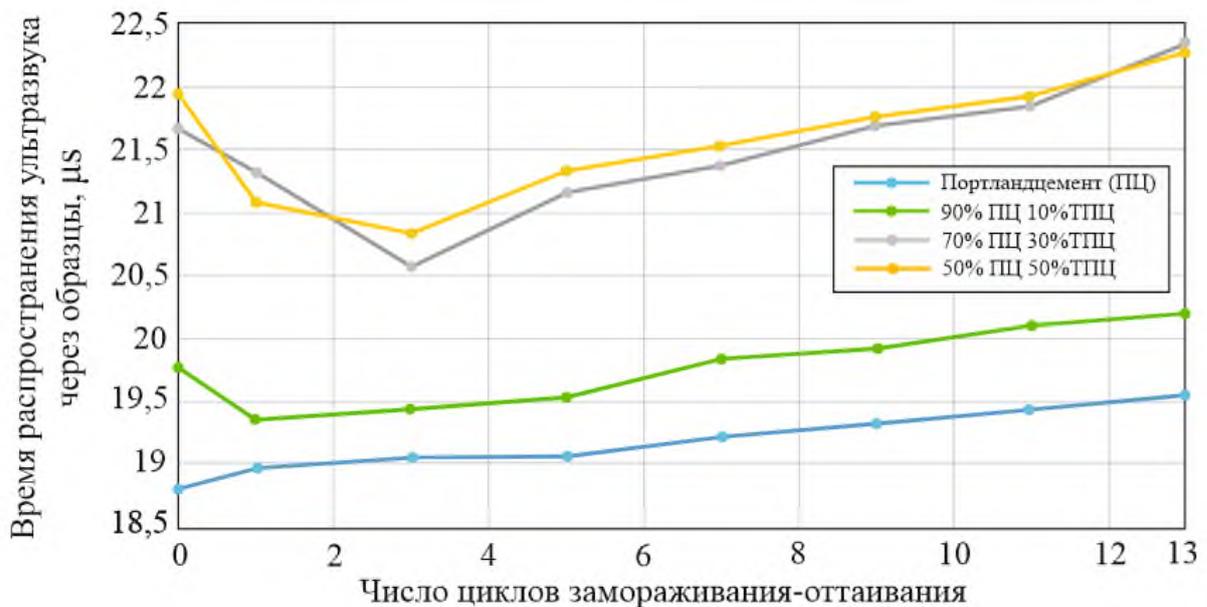
По завершению этапа установления градуированной зависимости (таблица 3.7), все серии образцов с различным количеством введенного тонкомолотого природного цеолита подвергались попеременному замораживанию-оттаиванию. После завершения каждого цикла для образцов были проведены замеры и определены средние значения параллельных испытаний времени распространения ультразвука (таблица 3.8, рисунок 3.10) и с помощью формулы 3.2 вычислены прочностные характеристики (таблица 3.9, рисунок 3.11).

**Таблица 3.7** – Установления градуировочной зависимости «время распространения ультразвука – прочность»

Состав вяжущего	$R_{jf}$ , МПа	$t_{jf}$ , мкс	$\overline{R}_f$ , МПа	$\bar{t}$ , мкс	$a_1$	$a_0$
Портландцемент (ПЦ)	32,30	19,85	25,29	21,31	-2,99	89,02
	25,95	20,96				
90% ПЦ 10% ТПЦ	21,99	22,32				
	26,27	22,10				
70% ПЦ 30% ТПЦ	31,18	19,53				
	22,37	19,99				
50% ПЦ 50% ТПЦ	21,49	22,67				
	20,79	23,04				

**Таблица 3.8** – Время распространения ультразвука через цементный камень разного состава в зависимости от циклов замораживания и оттаивания

Вязущее	Количество циклов замораживания-оттаивания							
	0	1	3	5	7	9	11	13
Портландцемент (ПЦ)	18,82	18,96	19,04	19,05	19,21	19,31	19,43	19,53
90% ПЦ 10% ТПЦ	19,75	19,34	19,43	19,51	19,82	19,91	20,10	20,19
70% ПЦ 30% ТПЦ	21,66	21,31	20,57	21,15	21,36	21,69	21,85	22,32
50% ПЦ 50% ТПЦ	21,93	21,07	20,83	21,33	21,52	21,76	21,91	22,26



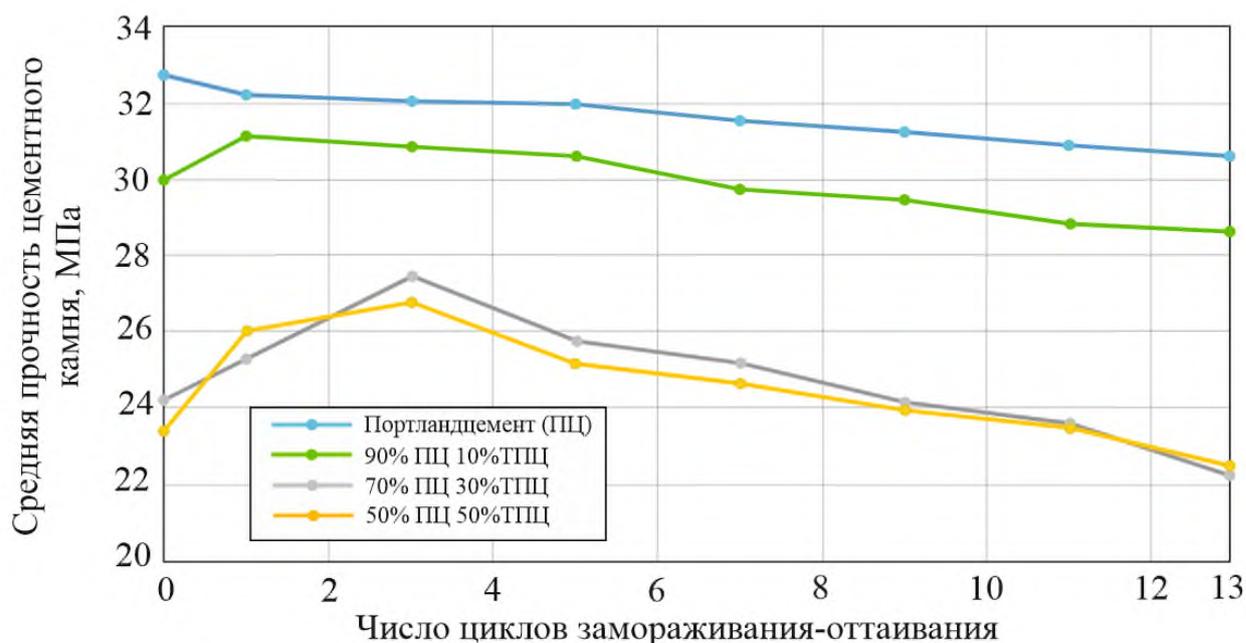
**Рисунок 3.10** – Время распространения ультразвука через цементный камень различного состава в зависимости от циклов замораживания и оттаивания

Во-первых, прочность цементного камня на чистом портландцементе ЦЕМ I 42,5Н до начала замораживания соответствовала марочной, несмотря на погрешность аппроксимации градуированной кривой. Во-вторых, уже после первого цикла замораживания-оттаивания прочность в этом же образце начала

снижаться, что указывает на завершение набора прочности и начале процессов деструкции под действием отрицательных температур. В-третьих, образцы с добавкой ТЩ показали способность к восстановлению прочностных характеристик, что подтверждает активное протекание пуццолановых реакций даже в условиях попеременного замораживания-оттаивания.

**Таблица 3.9** – Прочность цементного камня различного состава в зависимости от циклов замораживания и оттаивания

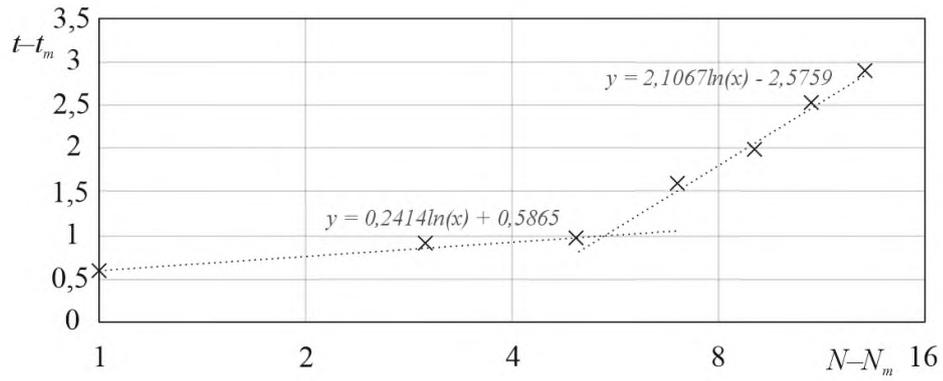
Вязущее	Количество циклов замораживания-оттаивания							
	0	1	3	5	7	9	11	13
Портландцемент (ПЩ)	32,74	32,32	32,08	32,04	31,57	31,27	30,90	30,60
90% ПЩ 10% ТЩ	29,94	31,18	30,90	30,66	29,74	29,48	28,91	28,64
70% ПЩ 30% ТЩ	24,23	25,28	27,49	25,78	25,13	24,15	23,67	22,27
50% ПЩ 50% ТЩ	23,44	26,00	26,71	25,23	24,66	23,95	23,50	22,45



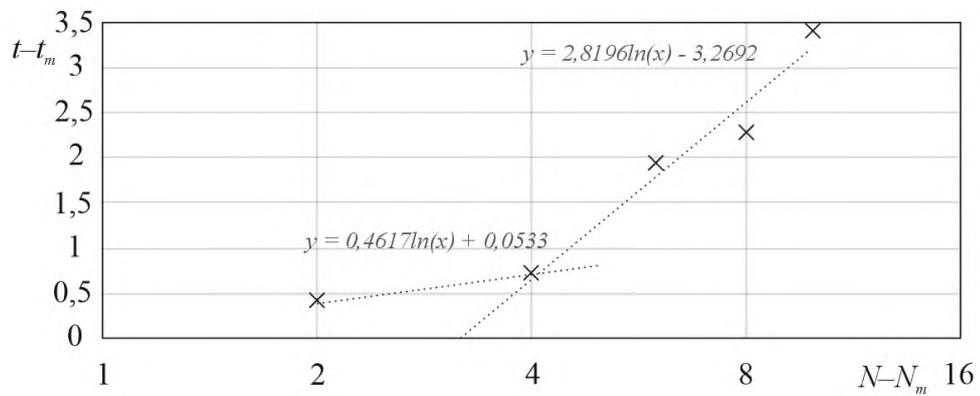
**Рисунок 3.11** – Прочность цементного камня различного состава в зависимости от циклов замораживания и оттаивания

Анализируя рисунок 3.11, можно заметить, что в случае с добавлением 10% ТПЦ после 1 цикла замораживания-оттаивания отмечается увеличение значения средней прочности цементного камня на 4%, далее происходит плавное уменьшение по мере увеличения циклов испытаний. Стоит отметить, что пик прочности для образцов с добавлением 30% и 50% ТПЦ достигается на 3 цикле, что в сравнении на 13% выше значения, равное на 28 сутки твердения. После прохождения 5 цикла для исследуемых образцов отмечается резкое снижение прочностных характеристик, которое можно объяснить началом ускоренной деструкции. Таким образом, замедленное твердение вяжущих композиций с добавкой природного цеолита, обуславливает повышение прочностных характеристик цементного камня, подвергнувшегося циклическому воздействию замораживания-оттаивания. Не последнюю роль в продолжении набора прочности играет водяная среда замораживания-оттаивания образцов. Так как замораживание и оттаивание происходит не мгновенно, то во время положительных температур установленного режима продолжают незаконченные пуццолановые реакции при условии наличия добавки молотого природного цеолита. Исходя из выше сказанного, дополняются выводы работы авторов из *Southeast University* «о возможности стандартного отверждения бетонов, поврежденных циклами замораживания-оттаивания в раннем возрасте» [206].

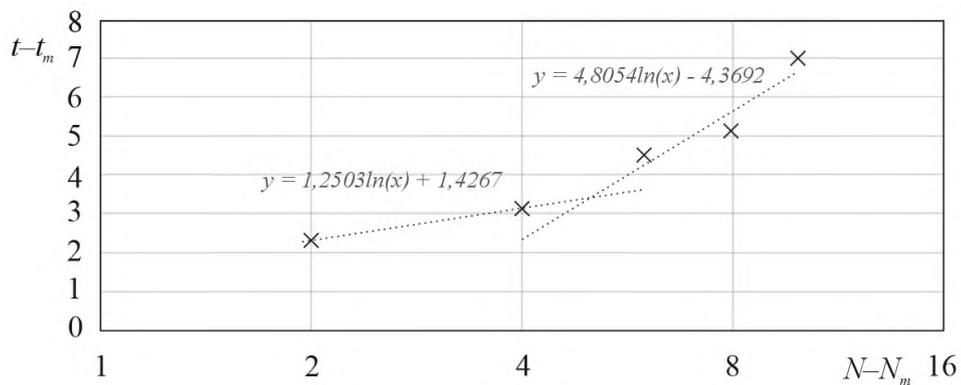
Для определения морозостойкости образцов цементного камня каждого состава вяжущего согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 26134-2016, на логарифмических графиках  $(N-N_m)-(t-t_m)$  нанесены изменения средних суммарных значений времени распространения ультразвука через 4 канала прозвучивания образцов относительно минимального зафиксированного значения взятого за  $t_m$  и соответствующему ему значению циклов замораживания-оттаивания –  $N_m$  (рисунки 3.12–3.15). Полученные точки разделены на две группы соответствующих точек – до и после резкого увеличения времени распространения ультразвука, регрессионным методом найдены линейные зависимости для каждой группы точек.



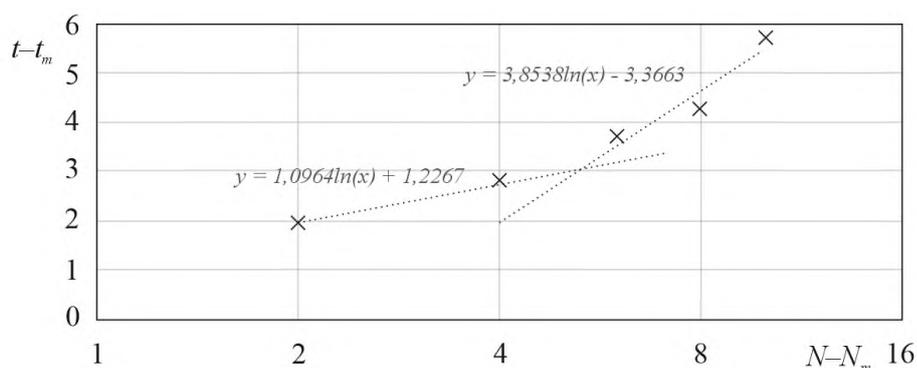
**Рисунок 3.12** – График ультразвуковых измерений чистого портландцемента



**Рисунок 3.13** – График ультразвуковых измерений портландцемента с добавкой 10% молотого природного цеолита



**Рисунок 3.14** – График ультразвуковых измерений портландцемента с добавкой 30% молотого природного цеолита



**Рисунок 3.15** – График ультразвуковых измерений портландцемента с добавкой 50% молотого природного цеолита

Исходя из полученных логарифмических уравнений для каждого образца определены критические точки перелома ( $K$ ) и значение критического цикла замораживания-оттаивания ( $M$ ). Согласно ГОСТ 26134-2016 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости», значение точки ( $M$ ) определяет показатель марки по морозостойкости для каждого образца (таблица 3.10). В образцах с 30% и 50% ТПЦ отмечается повышенная марка по морозостойкости цементного камня, равная значению F400. В свою очередь в образце с добавлением 10% ТПЦ наблюдается меньшее значение марки по морозостойкости, равное F300.

**Таблица 3.10** – Данные о морозостойкости цементного камня различного состава

Состав вяжущего	$t_m$	$N_m$	$K$	$M$	Марка по морозостойкости
Портландцемент (ПЦ)	75,27	0	5,45	5	F300
90% ПЦ 10% ТПЦ	77,36	1	4,09	5	F300
70% ПЦ 30% ТПЦ	82,29	3	5,11	8	F400
50% ПЦ 50% ТПЦ	83,33	3	5,28	8	F400

Следовательно, введение природного цеолита в состав цементного камня, за счет своих пуццолановых свойств приводит к повышению морозостойкости, что согласовывается с исследованиями Китайских ученых, которые также

отменили, что «морозостойкость может не зависеть от степени прочности бетона» [207].

Таким образом, в ходе исследования была изучена динамика изменения прочностных характеристик цементного камня при циклическом воздействии отрицательных температур. Установлена градуированная зависимость между времен распространения ультразвука и прочностью, имеющая достоверность аппроксимации  $R^2=0,87$ . Получены зависимости изменения прочности образцов с различным количеством добавок природного цеолита от количества циклов замораживания-оттаивания. Отмечено, что замедленная кинетика набора прочности вяжущих систем с добавкой природного цеолита обеспечивает продление процессов набора прочности цементного камня, уже подвергшегося деструктивному влиянию циклов попеременного замораживания-оттаивания. В отличие от чистого портландцемента, показывающего снижение прочности уже после 1-го цикла замораживания-оттаивания, то при добавлении тонкомолотого природного цеолита характерно сохранение способности к набору прочности в этих условиях. При добавлении 10% тонкомолотого природного цеолита снижение прочности фиксируется после 3 цикла, при введении 30% и 50% после 5-го цикла. Это связано с пролонгированным характером пуццолановых реакций, протекающих с меньше скоростью по сравнению с обычной гидратацией цемента, которая завершается на 28 сутки. Увеличение доли цеолита способствует более длительному сохранению способности к набору прочности материалом, поврежденным в ходе попеременного низкотемпературного воздействия. Рост прочности цементного камня при введении молотого природного цеолита напрямую способствует повышению его морозостойкости. В частности, добавка 30% и более тонкомолотого природного цеолита месторождения Хонгуруу позволяет увеличить число циклов замораживания-оттаивания, что создает возможность повышения марки по морозостойкости цементного камня с F300 до F400.

### 3.4. Разработка состава композиционного вяжущего с применением природного цеолита

Исследование применения цеолитсодержащих пород, в особенности месторождения Хонгуруу, для их применения в одной из самых ресурсоемких отраслей промышленного сектора – строительства, является весьма актуальной и перспективной, которая создаст необходимые предпосылки для освоения месторождений по технологическому направлению строительных вяжущих материалов. Так в работе [160] установлена способность цеолитовых пород проявлять высокую активность по отношению к растворам  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ , что делает возможным их применение в цементно-цеолитовых вяжущих.

Так в рамках данной работы на основе природного цеолита было приготовлено 3 вида вяжущих различного состава с общей удельной поверхностью  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Количество вводимого природного цеолита, взамен портландцемента, в состав вяжущих составило до 30% с шагом 15% (таблица 3.11).

**Таблица 3.11** – Составы разрабатываемых вяжущих на природном цеолите месторождения Хонгуруу

Название вяжущего	Состав вяжущего, %	
	Цемент	Кремнеземистые компонент
ЦЕМ I 42,5Н (контроль)	100	-
ТМЦ–70	70	30
ТМЦ–85	85	15

Выбор вяжущего ТМЦ–85 обусловлен исходя из соотношения «количество циклов замораживания-оттаивания» – «прочность ЦК» по результатам исследования, приведенные в п. 3.3 настоящей диссертации. При добавке 10% ТПЦ образец ЦК показывает среднюю прочность на сжатие в 29,9 МПа, однако после 1 цикла замораживания-оттаивания наблюдается динамика снижения прочности ЦК, свидетельствуя о внутреннем повреждении от попеременного замораживания, которая не удовлетворяет поставленному

требованию. Образцы с добавкой 30% и 50% ТПЦ имеют более низкий показатель прочности, равные 24,2 МПа и 23,4 МПа соответственно. При этом, как показывают данные, несмотря на продолжительность попеременного замораживания и оттаивания до 3 циклов, происходит набор прочности ЦК за счет пролонгации гидратационных процессов, что и приводит к частичному восстановлению прочности цементного камня, поврежденного от попеременного замораживания и оттаивания. Глядя на рисунок 3.11, кривая средней прочности ЦК на 3 цикле замораживания-оттаивания образцов 70% ПЦ 30% ТПЦ и 50% ПЦ 50% ТПЦ имеет тенденцию к увеличению прочностных характеристик ранее испытанных образцов при условии небольшого снижения доли вводимого природного цеолита. Между вяжущим на чистом портландцементе и вяжущим, обладающим наилучшими показателями прочности и морозостойкости, присутствует разница в 30% по содержанию клинкерной составляющей. Для достижения оптимального баланса между прочностными характеристиками и показателями по морозостойкости целесообразно рассмотреть вяжущее, с процентным содержанием вводимого ТПЦ взамен цемента равное в 15%. С учетом выявленных закономерностей изменения прочности цементного камня от содержания добавки ТПЦ, было получено 2 вида композиционных вяжущих – ТМЦ–70 и ТМЦ–85.

Для получения данных о качестве, разработанных вяжущих, были изучены их основные физико-механические показатели по соответствующим нормативным методикам (таблица 3.12).

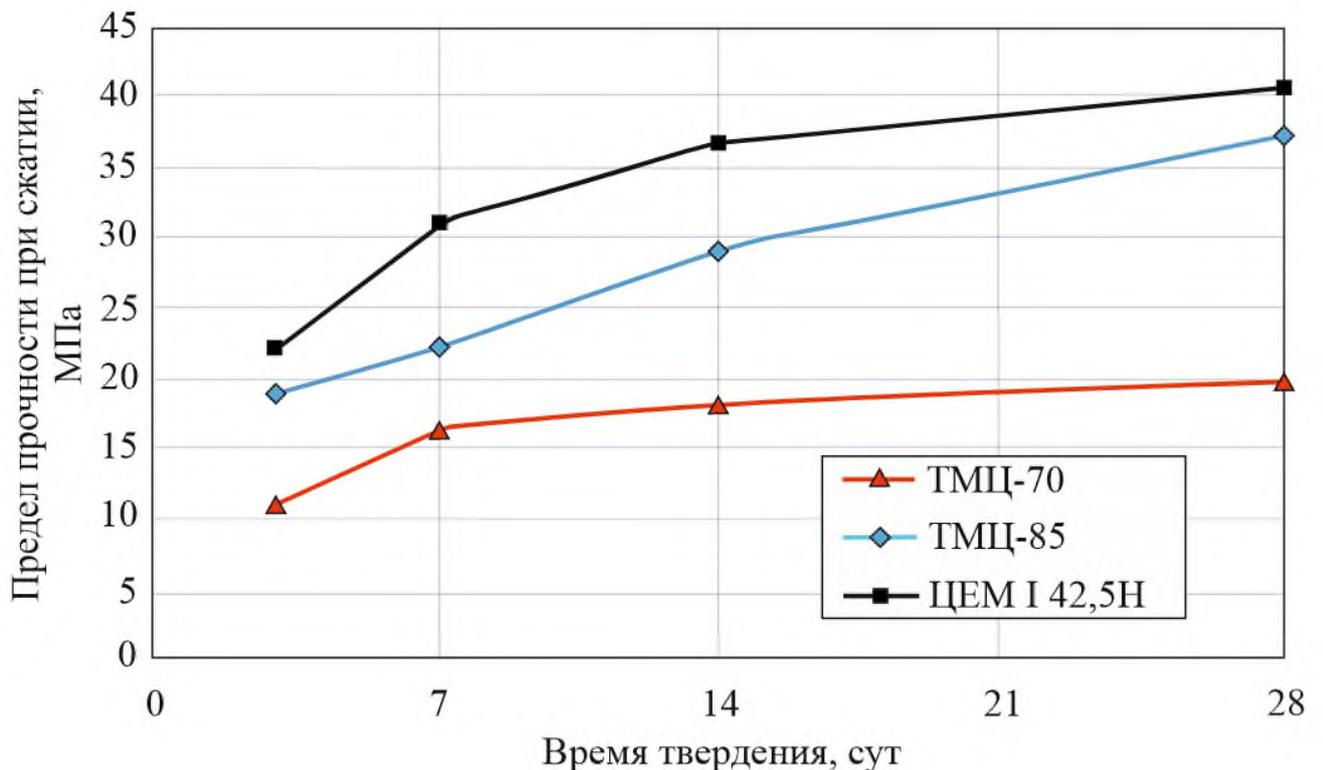
Образцы вяжущих с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу характеризуются поздними сроками начала и конца схватывания, так ТМЦ–70, в который было введено 30% цеолитового порошка, показывает самый поздний срок твердения. Это подтверждает предположение исследователей [208] о том, что цеолит замедляет процессы схватывания, которые могут оказать влияние на процессы кристаллизации новообразований. Анализ основных характеристик вяжущих показал снижение прочности,

коррелирующей с увеличением минеральной добавки в виде природного цеолита.

**Таблица 3.12** – Физико-механические свойства вяжущих в зависимости от состава

Вяжущее	НГ	Начало схватывания, мин	Конец схватывания, мин	Активность, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	26	140	210	41,4
ТМЦ-70	34	170	250	19,9
ТМЦ-85	28	160	230	37,9

Формирование оптимальной структуры цементных композитов определяется не только их конечной прочностью, но и кинетикой ее набора (рисунок 3.16).



**Рисунок 3.16** – Кинетика набора прочности вяжущих в зависимости от состава

Согласно полученным данным прочностные характеристики ТМЦ-85 ниже на 8,5–26% по сравнению с портландцементом ЦЕМ I 42,5Н, с максимальной разницей в возрасте 7 суток и минимальной в возрасте 28 суток.

Уменьшение разницы может быть связано с более медленным набором прочности ТМЦ–85, когда как ЦЕМ I 42,5Н имеет классический набор прочности при котором более 70% прочности набирается на 7 сутки. При этом стоит учитывать, что клинкерная составляющая в вяжущем ТМЦ–85 сокращена на 15%, а полученная разница в прочности 8,5 %, что говорит о некотором вкладе кремнеземистого компонент вяжущего в набор прочности. Разница в прочностных характеристиках ТМЦ–70 по сравнению с ЦЕМ I 42,5Н являются заметными на всех сроках твердения: разница составляет до 50,7%.

Для определения кинетики твердения вяжущего с оптимальным набором прочностных характеристик применялась расчетная методика, разработанная д.т.н., профессором Ш.М. Рахимбаевым [191], которая предполагает определение коэффициента торможения процесса гидратации цемента на основе полученных данных прочности вяжущих на 3, 7, 14 и 28 сутки соответственно (таблица 3.13). В работе [209] расчет кинетики твердения применяется для классических цементных систем, однако в работе [210] также и для композиционных вяжущих.

Расчет основан на теории переноса [211], в котором кинетика твердения вяжущих описывается следующим образом:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \cdot \sigma \quad (3.5)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \cdot \tau \quad (3.6)$$

где,  $\sigma$  – предел прочности при сжатии, МПа;

$\tau$  – время твердения (гидратации), сут;

$\left( \frac{\tau}{\sigma} \right)_0$  – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации),

сут/МПа;

$k_1, k_2$  – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

На основании теории переноса выводится уравнение кинетики гетерогенных реакций, позволяющее определять прогнозируемую прочность вяжущих:

$$\sigma = \frac{\tau \cdot U_0}{1 + \tau \cdot U_0 \cdot K_{\text{тор}}} \quad (3.7)$$

Стоит отметить, что применение теории переноса также нашло свое применение в исследованиях теплоизоляционных материалах [212].

На основании полученных данных по таблице 3.13 был проведен расчет определения кинетических констант, а именно:  $U_0$  – начальная скорость;  $K_{\text{тор}}$  – коэффициент торможения;  $K_{\text{кор}}$  – коэффициент корреляции. Результаты приведены в таблице 3.14.

**Таблица 3.13** – Прочность вяжущих в зависимости от сроков твердения

№ п/п	Вяжущее	Естественное твердение, сут.			
		3	7	14	28
		Предел прочности при сжатии, МПа			
1	ЦЕМ I 42,5Н	21,5	30	34,4	41,4
2	ТМЦ–70	11	15	18	19,9
3	ТМЦ–85	18	22,2	28,6	37,9

**Таблица 3.14** – Результаты расчета по уравнениям теории переноса

Вяжущее	Значения кинетических констант при расчёте		
	$U_0$	$K_{\text{тор}}$	$K_{\text{кор}}$
ЦЕМ I 42,5Н	24,75	0,0236	0,995
ТМЦ–70	14,38	0,0483	0,9962
ТМЦ–85	12,91	0,0255	0,98

Установлено, что вяжущие ТМЦ–70 и ТМЦ–85 характеризуются сниженными начальными скоростями твердения по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5Н, составившими соответственно 14,38 и 12,91 против 24,75, что негативно отражается на значениях прочности в отдаленные сроки твердения.

Для композиционного вяжущего ТМЦ–70 наблюдается двухкратное увеличение коэффициента торможения (с 0,0236 до 0,0483) относительно чистого цемента. Основной причиной подобного явления является снижение доли клинкерной составляющей, что, в свою очередь, обуславливает более низкую марочную прочность композиционного вяжущего и практическое отсутствие набора прочности после 28 суток твердения. Разница в прочностных характеристиках между композиционными вяжущими ТМЦ–70 и ТМЦ–85 на 28 сутки составила 47,5%. У вяжущего ТМЦ–85 коэффициент торможения по сравнению с исходным цементном почти не изменяется, что позволяет этому вяжущему продолжать набор прочности, не смотря на сниженную клинкерную составляющую и позволяет нам делать вывод о наличии новых химических реакциях.

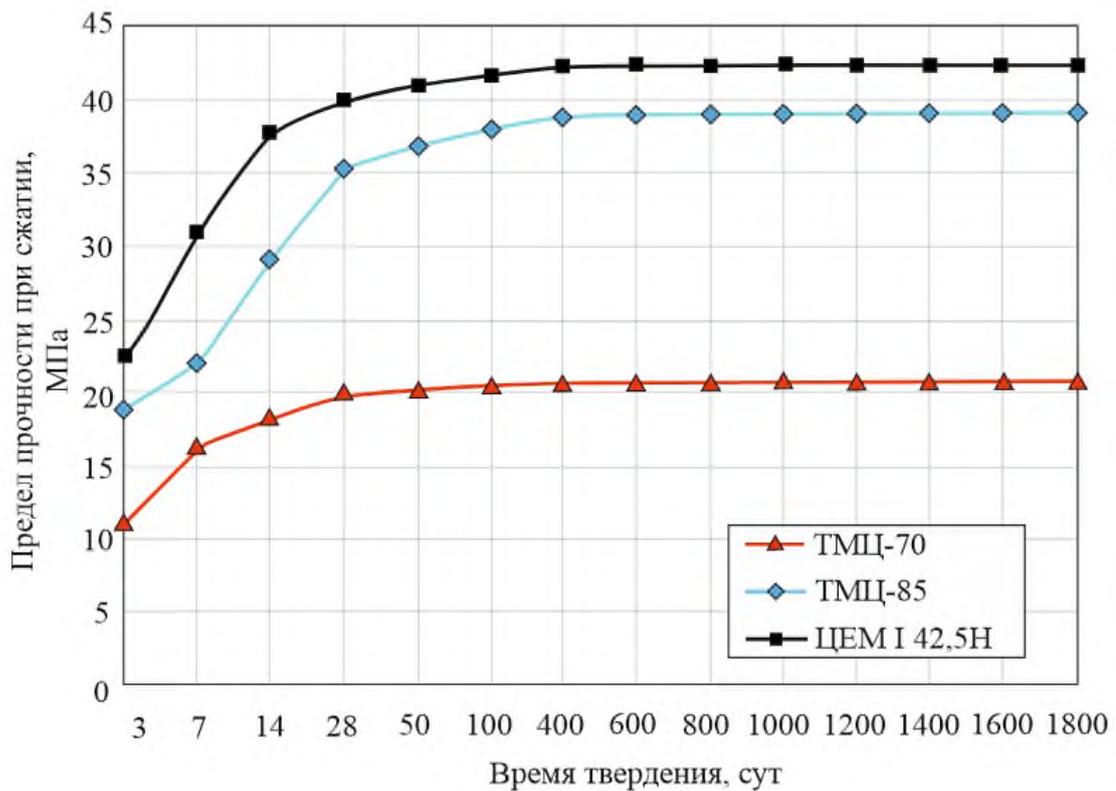
Для подтверждения адекватности кинетических констант, приведенных в таблице 3.15, которые позволяют рассчитать кинетику твердения вяжущего по формуле 3.7, проведено сопоставление результатов расчетных и экспериментально установленных величин прочности композиционных вяжущих. Результаты сведены в таблицу 3.15. Так отмечается высокая сходимость расчетных прочностей с экспериментальными значениями.

**Таблица 3.15** – Расчетные прочности цементного камня в возрасте 28 суток

Вяжущее	$\sigma_{\text{расчетное}}$ , МПа	$\sigma_{\text{экспериментальное}}$ , МПа	Отклонение $\Delta$ , МПа	Отклонение $\Delta$ , %
ЦЕМ I 42,5Н	40,45	41,4	0,94	2,2
ТМЦ–70	19,69	19,9	0,20	1,04
ТМЦ–85	37,13	37,9	0,76	2,01

Удостоверившись в адекватности полученных кинетических констант был произведен расчет прочности на длительный срок. Анализ линий кинетики твердения свидетельствует о схожести характера процессов набора прочности независимо от вида вяжущего.

Для вяжущих на чистом портландцементе ЦЕМ I 42,5Н и композиционном вяжущем ТМЦ–70 характерен интенсивный рост прочности в первые 7–14 суток, после которого скорость процесса резко снижается (рисунок 3.17). Для ТМЦ–85 наблюдаются процессы замедленного прироста прочности в течение первой недели, с последующей активной стадией набора прочности, продолжающейся до 28 суток. Во всех случаях основные гидратационные процессы завершаются к 400 суткам. Разница в прочностных характеристиках между вяжущими ТМЦ–85 и ЦЕМ I 42,5Н, зафиксированная на 28 сутки со значением 11,25%, сохраняется на протяжении всего процесса твердения. Напротив, разница прочностных характеристик между ТМЦ–70 и ЦЕМ I 42,5Н, изначально достигающая около 50%, возрастает до 52%, что иллюстрирует ранее рассчитанного коэффициента торможения для композиционного вяжущего ТМЦ–70.



**Рисунок 3.17** – Кинетика набора прочности вяжущих в зависимости от состава

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность получения композиционного вяжущего различных марок с использованием природного цеолита месторождения Хонгуруу, которая обеспечивает получение изделия с физико-механическими характеристиками сопоставимыми с исходным цементом при снижении доле цемента в составе вяжущего. Композиционные вяжущие с применением природного цеолита характеризуются сниженными начальными скоростями твердения по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5Н. За счет пуццолановой активности цеолита в составе композиционного вяжущего сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения, соответствующего исходному портландцементу, а также повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %. Разработан состав композиционного вяжущего ТМЦ–85 с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу с активностью в 37,9 МПа.

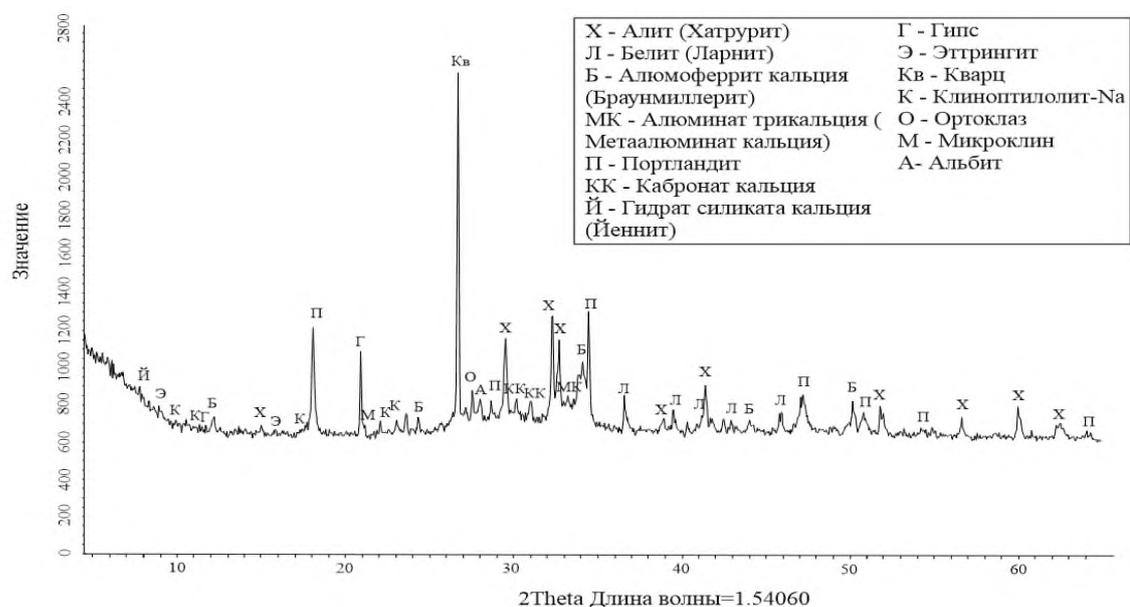
### **3.5. Влияние композиционного вяжущего с применением природного цеолита на структурообразование цементного камня**

В настоящее время классические цементные вяжущие характеризуются высокой степенью изученностью с точки зрения фазообразования и формирования структуры композита в зависимости от различных факторов [213-217]. В то же время совершенно новые [218-221], в том числе композиционные вяжущие, характеризуются слабой изученностью в части понимания процессов, которые происходят на уровне фазо- и структурообразования.

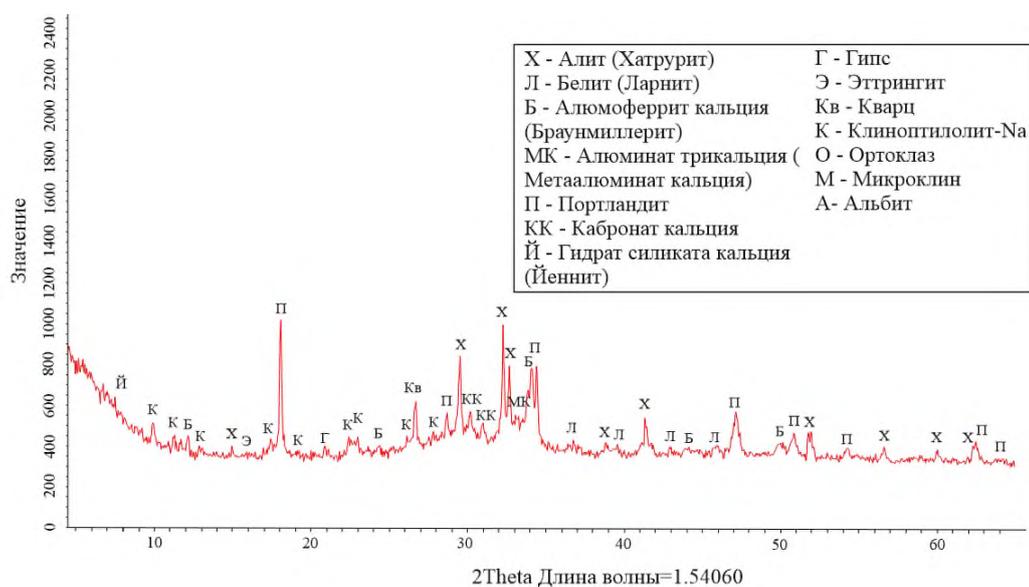
Детальных исследований по изучению механизмов структуро- и фазообразования композиционных вяжущих с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу не осуществлялось, что и является одной из целей данной работы.

Для этого из вяжущего без заполнителя формовались лабораторные образцы размером 2×2×2 см из разработанного композиционного вяжущего ТМЦ–85 и цемента марки I 42,5Н.

Для определения минералогического состава подготовленных образцов была проведена рентгенометрическая диагностика (количественный РФА) кристаллических минеральных компонентов вяжущего. Результаты приведены на рисунках 3.18, 3.19. Минералогические составы вяжущих представлены в таблице 3.16.



**Рисунок 3.18** – Минералогический состав вяжущего на цементе I 42,5Н (АО «Якутцемент»)



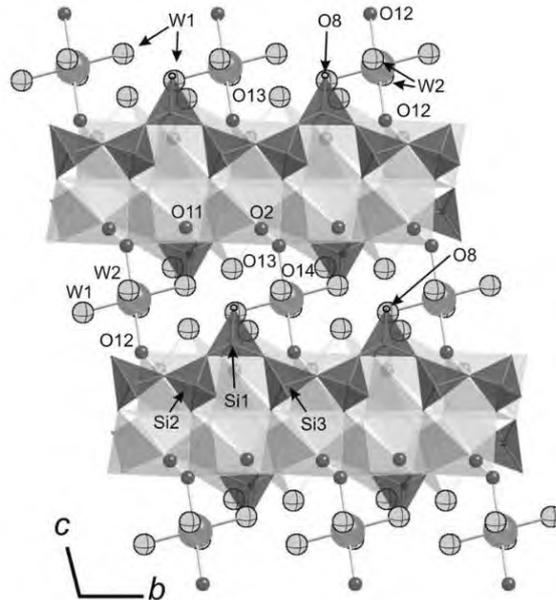
**Рисунок 3.19** – Минералогический состав композиционного вяжущего ТМЦ–85

**Таблица 3.16** – Минералогический состав вяжущих

Обозначение	Наименование	Химическая формула	ЦЕМ I 42,5Н	ТМЦ–85
Х	Алит (Хатрурит)	$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$	33,89%	17,38%
Л	Белит (Ларнит)	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	7,10%	15,06%
Б	Алюмоферрит кальция	$\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$	7,52%	13,41%
	(Браунмиллерит)			
МК	Алюминат кальция	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	3,70%	10,98%
	(Метаалюминат кальция)			
П	Портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	17,96%	11,09%
КК	Карбонат кальция	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	8,53%	1,33%
Д	Гидрат силиката кальция (Йеннит)	$\text{Ca}_9(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1,12%	2,20%
Г	Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,79%	1,71%
Э	Этtringит	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	2,10%	4,57%
Кв	Кварц	$\text{SiO}_2$	11,19%	7,72%
К	Клиноптилолит- Na	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0,00%	11,55%
О	Ортоклаз	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	0,00%	9,53%
М	Микроклин	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	3,50%	0,00%
А	Альбит	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	2,60%	0,00%

Согласно данным рентгенофазового анализа композиционное вяжущее ТМЦ–85 характеризуется снижением процентного содержания минералов трехкальциевого силиката (алита), портландита, карбоната кальция и кварца, которые отвечают за высокую механическую прочность, напрямую связано с уменьшением количества вводимого цемента в состав вяжущего. С другой

стороны, отмечается увеличением кристаллической фазы в виде низкоосновного гидросиликата – йеннита в 2 раза, по сравнению с вяжущим на чистом цементе. Исследователи Департамента науки о земле, Италия *E. Bonaccorsi, S. Merlino* [222] в своей работе подробно описывают взаимосвязь йеннита с наноструктурой C–S–H, где была предложена структурная модель (рисунок 3.20). В данной модели атомы Ca и Si показаны полиэдрами. Межслоевые атомы показаны Ca5 показаны большими серыми сферами. Молекулы воды представлены сферами с экваториальными эллипсоидами. Более подробное описание предложенной модели описано в работе [223]. Согласно этой модели, «цеолитовые» ионы Ca5 удерживают кальциевые слои йеннита и способствуют созданию высокопрочных кристаллических связей.



**Рисунок 3.20** – Структура йеннита, согласно рентгеновским уточнениям

*E. Bonaccorsi, S. Merlino* (Италия)

Дополнительное подтверждение снижения количества кальцита получено методом дифференциальной сканирующей калориметрии (рисунок 3.21). Анализ выполнен на приборе синхронного термического анализа фирмы NETZSCH – STA 449C Jupiter. Образцы вяжущих в PtRh тиглях нагревались от комнатной температуры до 1000°C., со скоростью нагрева 10°C/минут, в инертной среде – аргон. Для того чтобы провести сопоставимость результатов

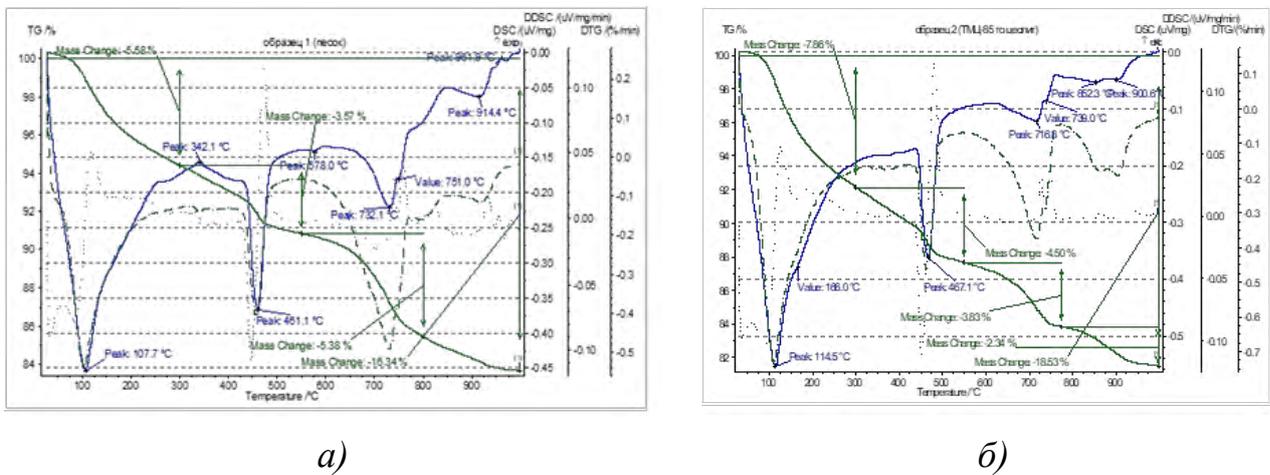
при равной массовой клинкерной составляющей, для вяжущего на портландцементе был введен инертный компонент—кварцевый песок в количестве 15%.

На дифференциальных кривых нагревания DSC (рисунок 3.21) в двух образцах вяжущих фиксируются 3 основных эндотермических эффекта:

I – удаление слабосвязанной и в основном, адсорбированной воды (30-300°C);

II – Дегидратация гидроксида кальция (30-300°C);

III – Декарбонизация кальцита (550-800°C).



**Рисунок 3.21** – Дифференциальные кривые нагревания для образцов вяжущих  
*a)* – ЦЕМ I 42,5Н; *б)* – ТМЦ–85

Потеря массы образцов при нагревании идет ступенчато. Для выделенных интервалов по кривым термогравиметрического анализа (ТГ) для исследуемых образцов определены значения потери массы, указанные в таблице 3.17.

На дифференциальных кривых нагревания в интервале декарбонизации кальцита (550–800°C) заметно существенное снижение пика эндотермического эффекта и потери массы образца. Таким образом наиболее эффективным вяжущим является ТМЦ–85.

Структурные характеристики наряду с фазообразованием являются важнейшим фактором, которые отражают свойства композитов. При проектировании композиционного вяжущего были рассмотрены структурные

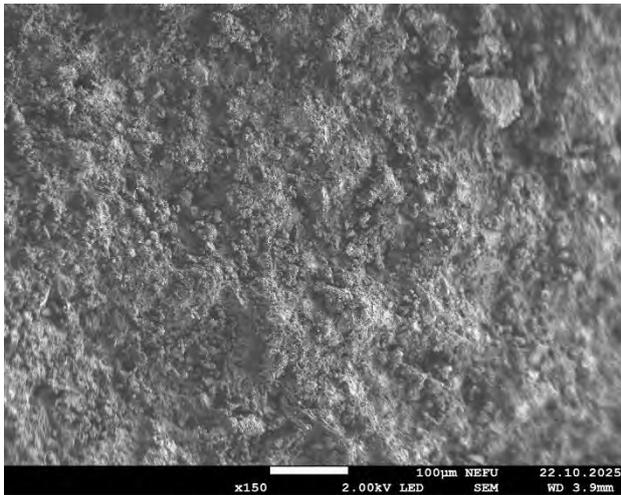
особенности образцов ЦК на основе портландцемента ЦЕМ I 42,5Н, ТМЦ–85 без заполнителей.

**Таблица 3.17** – Характер термических эффектов образцов вяжущих

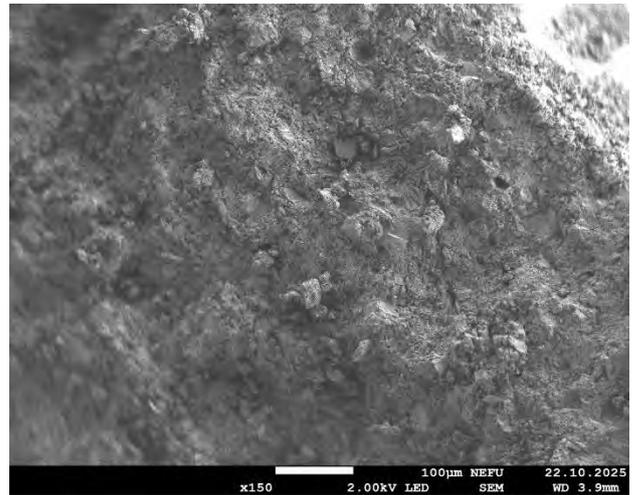
Термический эффект	Вяжущее			
	ЦЕМ I 42,5Н		ТМЦ–85	
	Максимальная температура, °С	Потеря массы, %	Максимальная температура, °С	Потеря массы, %
Первый эндотермический эффект (30–300°С – удаление слабосвязанной и адсорбированной воды)	107,7	5,58	114,5	7,86
Второй эндотермический эффект (400–550°С – дегидратации гидроксида кальция)	461,1	3,57	467,1	4,5
Третий эндотермический эффект (550–800°С – декарбонизации кальцита)	732,1	5,38	716,8	3,83

Анализ микроструктур композиционных вяжущих проводился методом растровой электронной микроскопии при помощи высокоточного микроскопа JEOL JSM-7800F (рисунок 3.22 и 3.23). Получение изображений происходит за счет ускоряющих напряжений. Микроскоп по своим техническим характеристикам позволяет работать в широком диапазоне от 25–1000000 крат.

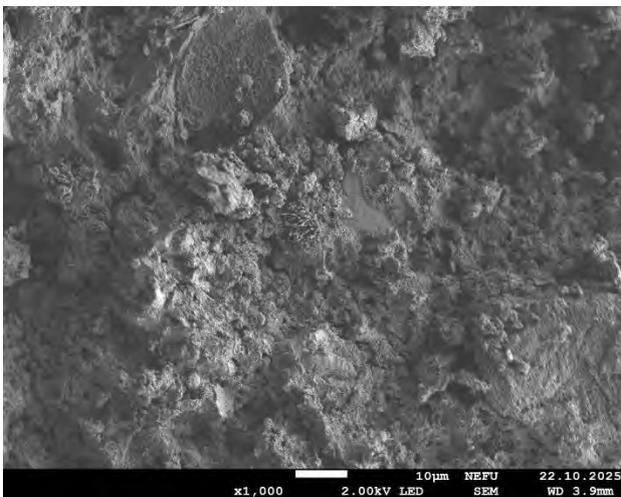
Анализ микроструктуры вяжущего ЦЕМ I 42,5Н (рисунок 3.22) показывает, что полностью выкристаллизованный цементный камень характеризуется плотной структурой. При этом плотная масса состоит из слабоограненных, плохокристаллизованных новообразований. В то же время наблюдается заполнение пустот удлинёнными игольчатыми кристаллами этtringита, заполняющие свободные поры, а также соединяющие стенки пор, что способствует высокой прочности образца на 28 сутки. Отчетливо наблюдаются крупные кристаллы слоистых гидросиликатов.



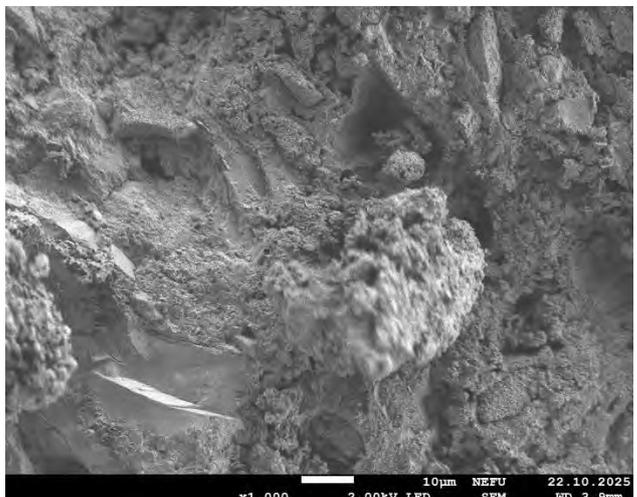
а)



б)



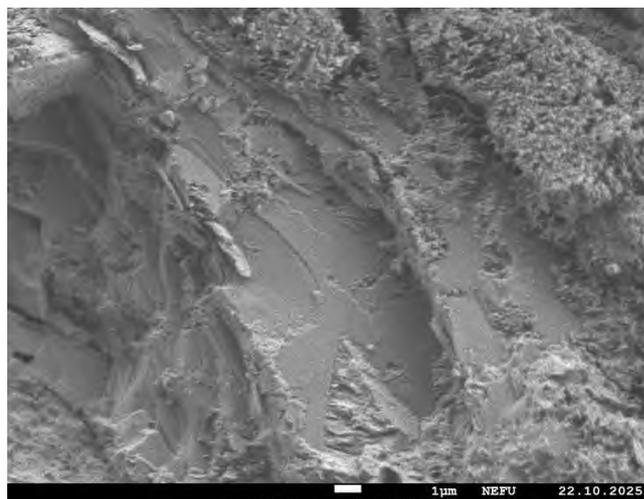
в)



з)



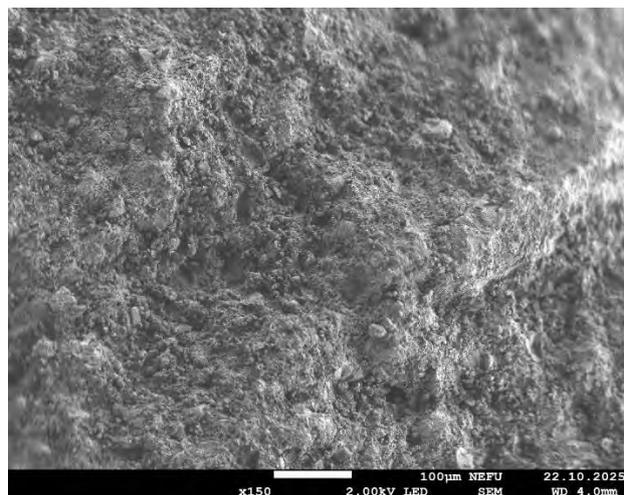
д)



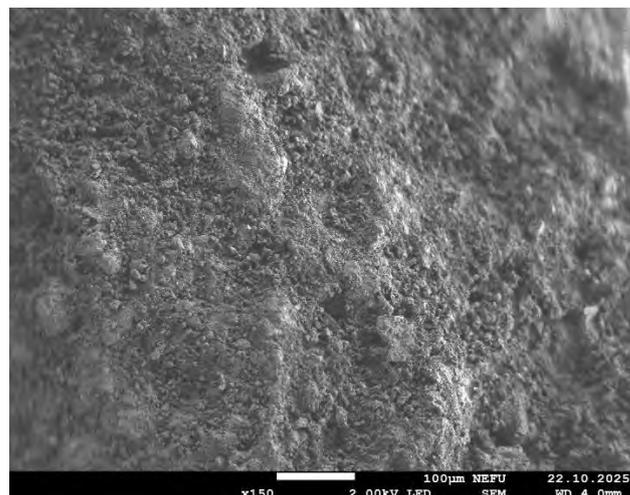
е)

**Рисунок 3.22** – Микроструктура цементного камня на вяжущем ЦЕМ 42,5Н

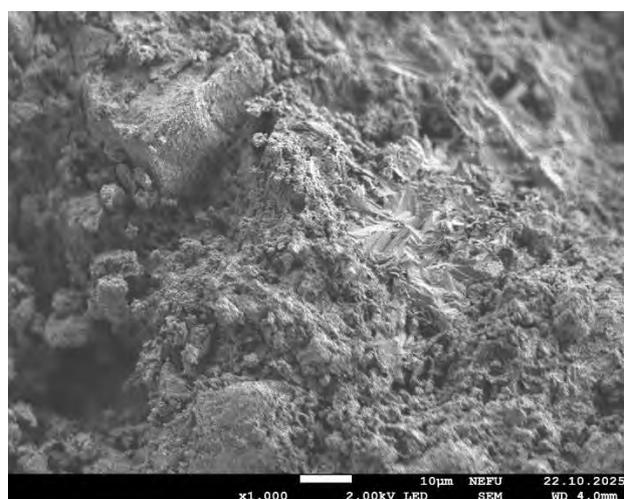
а), б) – масштаб x150; в), з) – масштаб x1000; д), е) – масштаб x5000



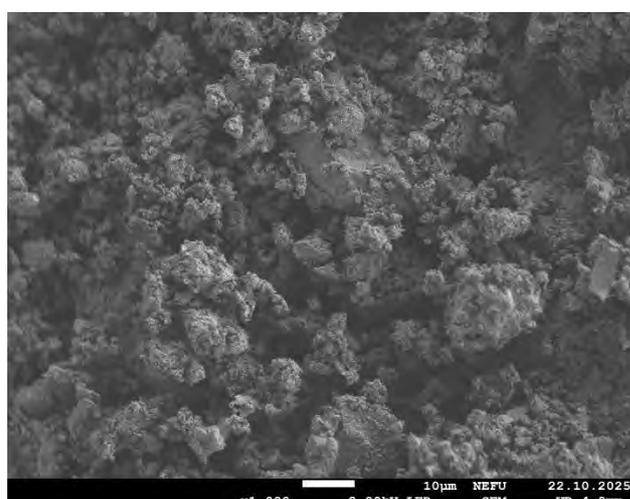
а)



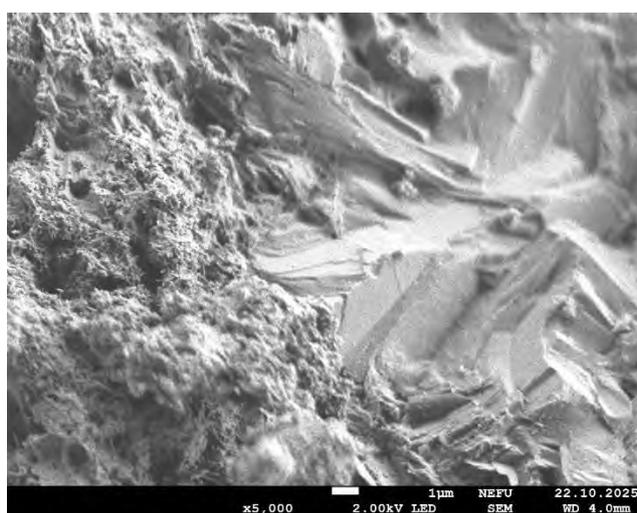
б)



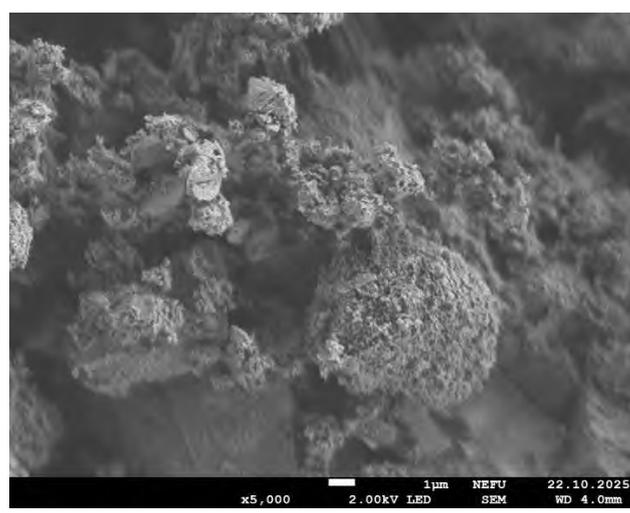
в)



з)



д)



е)

**Рисунок 3.23** – Микроструктура цементного камня на вяжущем ТМЦ–85

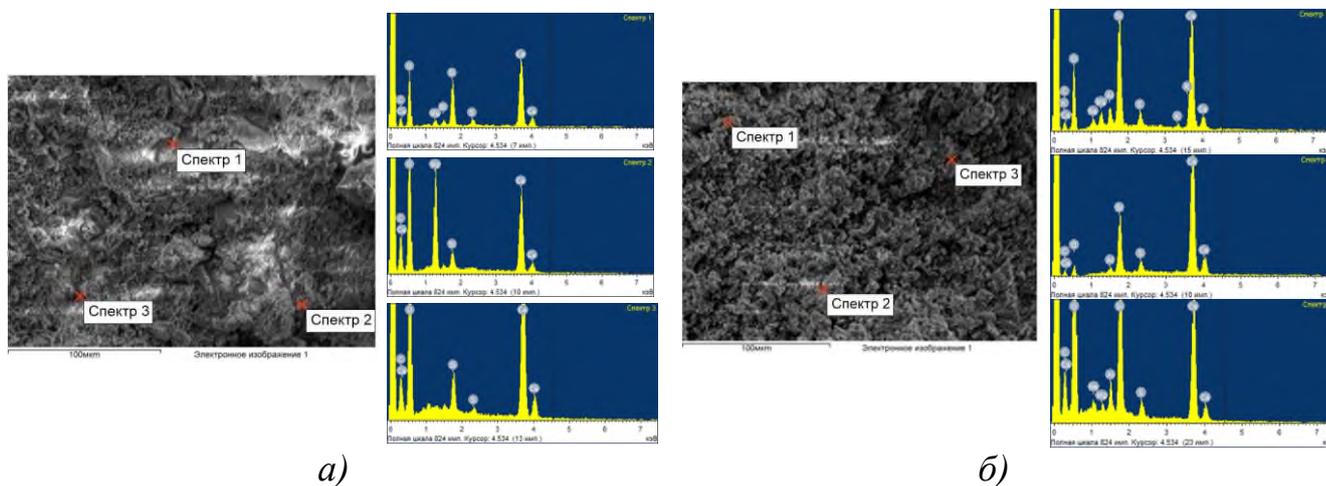
а), б) – масштаб x150; в), з) – масштаб x1000; д), е) – масштаб x5000

Образец композиционного вяжущего ТМЦ–85 (рисунок 3.23) характеризуются сильной кристаллизацией с хаотичными рыхлыми новообразованиями. Цементный камень имеет пористую «губчатую» структуру, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках, однако способно повысить морозостойкость за счет формирования более оптимального пористого строения. На снимках наблюдаются не плотные агрегации в виде мелких частиц, поверхность которых характеризуются плотным зарастанием гидросиликатным гелем, что предположительно подтверждает пуццолановую активность природного цеолита в составе вяжущего.

В современном мире исследований установлена большая роль геля силиката кальция – С-S-H на механизм твердения бетона [224, 225]. Гель не имеет фиксированного химического состава в пределах объема замеса, поэтому этот показатель характеризуют соотношением Ca/Si. Ниже приведены результаты спектрального анализа изучаемых вяжущих.

Исходя из результатов спектрального анализа вяжущих видно, что химический состав ЦК имеет различный состав по всему объему матрицы (таблица 3.18, рисунки 3.24). У вяжущего ТМЦ–85 отображаются пики элементов Na, Al, K. Механизм создания долговечных композиций основан на синтезе кальциевых солей, дающих при гидратации щелочную среду. Наличие элементов щелочесодержащих соединений, в виде натрия и калия – это сильные основания, которые способны получить многокомпонентные системы с гидравлическими свойствами. Однако коллектив ученых [226] в ходе анализа состояния вопроса об закономерностях протекания процессов формирования структуры и прочности бесклнкерных вяжущих, пришли к тому, что минералы щелочноземельных алюмосиликатов, силикатов и алюминатов не вступают в реакцию с водой затворения. Для обеспечения протекания процессов гидратации необходимо повысить основность дисперсной фазы, что возможно за счет введения щелочного компонента.

По Е.Н. Полониной [227], пониженные значения соотношения Ca/Si в составе фаз С-S-H геля приводит к упорядоченности структуры на наноуровне, пропорционально повышению механических характеристик ЦК и бетона, чему и соответствуют значения для композиционного вяжущего ТМЦ–85.



**Рисунок 3.24** – Спектральный анализ вяжущих

*а)* – ЦЕМ I 42,5Н; *б)* – ТМЦ–85

**Таблица 3.18** – Спектральный анализ образцов вяжущих

Вяжущее	Спектр	Весовой процент содержания элементов в спектре, %										Ca/Si
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Br	
ЦЕМ I 42,5Н	1	5,84	39,06	-	1,01	-	8,75	1,45	-	42,36	1,52	4,8
	2	9,48	49,08	-	10,32	-	2,02	-	-	29,1	-	14,4
	3	4,28	52,9	-	-	-	2,76	0,54	-	39,6	-	14,3
ТМЦ–85	1	4,35	29,7	0,8	1,48	1,93	14,13	2,27	1,08	44,26	-	3,1
	2	2,68	9,47	-	-	0,73	9,87	2,44	-	74,8	-	7,6
	3	6,76	54,75	0,57	0,41	1,57	10,26	1,27	-	24,2	-	2,4

Таким образом, ТМЦ–85 характеризуется снижением количества портландита и кальцита и небольшим увеличением кристаллической фазы в виде низкоосновного гидросиликата – йеннита. Дополнительное подтверждение снижения количества кальцита получено методом дифференциальной сканирующей калориметрии, где на дифференциальных кривых нагревания в интервале декарбонизации кальцита (550–800 °С) заметно

существенное снижение пика эндотермического эффекта и потери массы образца. Сравнительный анализ микроструктуры показывает, что ТМЦ–85 имеет пористую «губчатую» структуру, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках, однако способно повысить морозостойкость за счет формирования более оптимального пористого строения. По данным спектрального анализа у ТМЦ–85 выявлены пики щелочных элементов Na, K, которые участвуют за долговечность в вяжущей композиций.

### **3.6. Выводы по главе 3**

1. Доказана эффективность природного цеолита месторождения Хонгуруу, как компонента композиционного вяжущего. Данный вид материала характеризуется полидисперсным составом благодаря составу материнских горных пород. Микроструктура цеолита характеризуется наличием частиц с раковистым изломом, чешуйчато-зернистыми и игольчатыми агрегатами, что говорит о высокой степени полиминеральности породы и некоторой разобъённости и рыхлости. Строение цеолита в совокупности с низкой твердостью преобладающего в породе минерала – клиноптилолита, высокой истинной плотностью, низкой средней плотностью высокой пористостью обеспечивает высокую размолоспособность на первой стадии помола, для сравнения она примерно в 2 раза выше, чем у полиминерального речного песка и более чем в 5 раз выше, чем у кварцевого песка. Гранулометрический состав ТПЦ, а также КВ на его основе, характеризуется полифракционным распределением частиц с наибольшими выраженными пиками в области размеров: для ТПЦ – 3, 15 и 65 мкм; для КВ с применением ТПЦ на портландцементе – 3, 5 и 15 мкм. Высокая активность природного цеолита обусловлена его полиминеральным составом, распределением частиц по размерам и особенностями их формы, которые определяют высокую активность по отношению к СаО и, как следствие, обеспечивают высокий показатель коэффициента качества как компонента композиционного вяжущего.

2. Изучен процесс изменения прочности цементного камня во время циклов замораживания-оттаивания, выявлена градуировочная зависимость «время распространения ультразвука – прочность» с достоверностью аппроксимации 0,87. Это позволило получить зависимости прочности образцов цементного камня с разным количеством добавок от циклов попеременного замораживания и оттаивания. Отмечено, что замедленный прирост прочности вяжущих с добавкой природного цеолита позволяет продолжить набор прочность цементного камня поврежденного от циклов замораживания и оттаивания. Так если для чистого цемента характерно снижение прочности уже после первого цикла, то при добавлении молотого природного цеолита прочность продолжает расти несмотря на подвергание циклам замораживания-оттаивания. При добавлении 10 % добавки молотого природного цеолита снижение прочности происходит после 3-го цикла, а при добавлении 30 % и 50 % после 5-го. Данный факт связан с более длительными процессами пуццолановых реакций, выходящих за пределы общепринятой скорости гидратации цемента составляющей 28 суток. Причем большее количество природного цеолита, позволяет сохранить набор прочности поврежденному цементному камню большим количеством циклов замораживания оттаивания. Повышению длительной прочности цементного камня при добавлении природного цеолита, приводит к увеличению морозостойкости. При добавлении 30 % и более молотого природного цеолита в портландцемент происходит увеличение критического числа циклов замораживания-оттаивания, за счет чего возможно увеличение марки по морозостойкости цементного камня с F300 до F400. Добавление меньшего количества добавки не изменяет критическое число циклов замораживания-оттаивания.

3. Экспериментально подтверждена возможность получения композиционного вяжущего различных марок с использованием природного цеолита месторождения Хонгуруу, которая обеспечивает получение изделия с физико-механическими характеристиками сопоставимыми с исходным цементом при снижении доле цемента в составе вяжущего. Композиционные

вяжущие с применением природного цеолита характеризуются сниженными начальными скоростями твердения по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5Н. За счет пуццолановой активности цеолита в составе композиционного вяжущего сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения, соответствующего исходному портландцементу, а также повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %.

Разработан состав композиционного вяжущего ТМЦ–85 с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу с активностью в 37,9 МПа.

4. ТМЦ-85 характеризуется снижением количества портландита и кальцита и небольшим увеличением кристаллической фазы в виде низкоосновного гидросиликата – йеннита. Дополнительное подтверждение снижения количества кальцита получено методом дифференциальной сканирующей калориметрии, где на дифференциальных кривых нагревания в интервале декарбонизации кальцита (550–800 °С) заметно существенное снижение пика эндотермического эффекта и потери массы образца. Сравнительный анализ микроструктуры показывает, что ТМЦ–85 имеет пористую «губчатую» структуру, что отрицательно сказывается на прочностных характеристиках, однако способно повысить морозостойкость за счет формирования более оптимального пористого строения. По данным спектрального анализа у ТМЦ–85 выявлены пики щелочных элементов Na, K, которые участвуют за долговечность в вяжущей композиций.

#### **4 РАЗРАБОТКА ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ И КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ**

В условиях ужесточения нормативной документации, предъявляемой к тепловой защите возводимых зданий и сооружений, строительная отрасль испытывает потребность в материалах, обладающих низкими значениями теплопроводности и повышенной прочностью. К этим материалам можно отнести легкие бетоны на пористых заполнителях. В основополагающих работах Г.А. Бужевича [228-231], а также в последних работах [45, 46, 232, 233], которые были направлены на исследования новых видов легких бетонов на пористых заполнителях, доказана их эффективность применения для наружных ограждающих конструкций.

В главе 3 данной диссертационной работы была доказана эффективность композиционного вяжущего с применением природного цеолита, которая обеспечивает получение изделия с физико-механическими характеристиками сопоставимыми с исходным цементом при снижении доле цемента в составе вяжущего, что делает возможным проектирование составов изделий с пониженной материалоемкостью. Дополнительно установлено, что тонкомолотый цементный камень, в состав которого входит природный цеолит месторождения Хонгуруу, способен повысить морозостойкость за счет формирования более оптимального пористого строения композита.

Путем поризации цементного камня в легком бетоне достигается снижение объемного веса материала, а также снижение доли вводимого пористого заполнителя. Очевидно, что необходимо найти разумный предел поризации композита, который обеспечивал бы получение легкого бетона необходимого объемного веса с высокой морозостойкостью и прочностью.

Резко-континентальный климат Якутии, для которого характерен длительный отопительный период, предопределяет образование значительного объема золошлаковых отходов в результате работы угольных котельных, которые можно

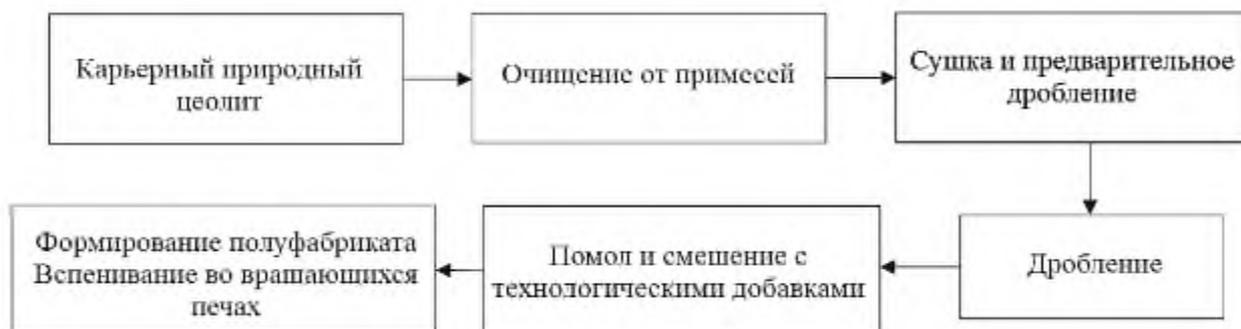
использовать для изготовления строительных материалов. Ежегодный объем производства золошлаковых отходов в Якутии достигает до 15 млн. тонн [234].

Однако, характер взаимодействия, происходящих в изделиях на тонкомолотых цементах с применением алюмосиликатного компонента, в зависимости от степени поризаций цементной матрицы, а также влияния золошлаковых отходов на свойства конечного материала остаются не до конца изученными.

#### **4.1. Свойства и структурные особенности пористых заполнителей**

Анализ исследований отечественных и зарубежных исследователей показал [235-239], что получаемое в настоящее время гранулированное пеностекло, используется в качестве заполнителя для получения конструктивно-теплоизоляционных бетонов с плотностью 500–1000 кг/м<sup>3</sup>. «На сегодняшний день из наиболее доступных и экологически безопасных пористых заполнителей, используемых для легких бетонов, является керамзитовый гравий» [240]. Однако керамзитовый гравий имеет ряд недостатков, связанных с большим количеством расколотых зерен при производстве, что предопределяет его низкую прочность на сдвливание.

На территории Республики Саха (Якутия) действует производственная линия на базе ООО «Сунтарцеолит» по выпуску пористых заполнителей из цеолитсодержащих пород месторождения Хонгуруу, называемый «пеноцеолит». Получение заполнителя происходит за счет интенсивного вспенивания шихты при температуре 850°C. Технология изготовления пеноцеолита представлена на рисунке 4.1. Она подразумевает формирование гранул из смеси тонкомолотого природного цеолита с водным раствором NaOH, с последующим его обжигом [241]. В данной работе для оценки возможности применения пеноцеолита производства ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар) в качестве крупного заполнителя для легких бетонов был произведен сравнительный анализ физико-механических характеристик гранулированного пеностекла, ЗАО «Модис» (г. Ярославль) и керамзитового гравия (рисунок 4.2).



**Рисунок 4.1** – Схема изготовления пеноцеолита ООО «Сунтарцеолит»



*а)*

*б)*

*в)*

**Рисунок 4.2** – Общий вид пористых заполнителей:

*а)* – гранулированное пеностекло; *б)* – гранулированный пеноцеолит;

*в)* – керамзитовый гравий

Определение основных физико-механических свойств образцов пористых заполнителей производилось в соответствии с ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ». Результаты приведены в таблице 4.1.

Согласно полученным данным об основных характеристиках пористых заполнителей (таблица 4.1), изучаемый пеноцеолит обладает промежуточными свойствами между пеностеклом и керамзитом, что делает его подходящим материалом исходя из цели исследования. Известно, что прочность бетона зависит от прочности составляющих его материалов и от прочности сцепления

их друг с другом, в связи с этим была проведена оценка активности поверхности пористых заполнителей по отношению к цементному раствору.

**Таблица 4.1**– Физико-механические характеристики пористых заполнителей

Материал	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Прочность на сжатие, МПа
Пеностекло (5-10 мм)	150	2,09	28,23	0,08	0,52
Пеноцеолит (5-20 мм)	240	2,02	22,78	0,1	0,86
Керамзит (5-10 мм)	502	2,03	14,8	0,12	1,75

Изучение механизмов взаимодействия поверхности пористого заполнителя играет большую роль на формирование физико-механических и теплотехнических свойств композита. Исследование активности пористых заполнителей по отношению к СаО производилась по методике, описанной в главе 2 настоящей работы. Результаты приведены в таблице 4.2.

**Таблица 4.2**– Активность поверхности пористых заполнителей

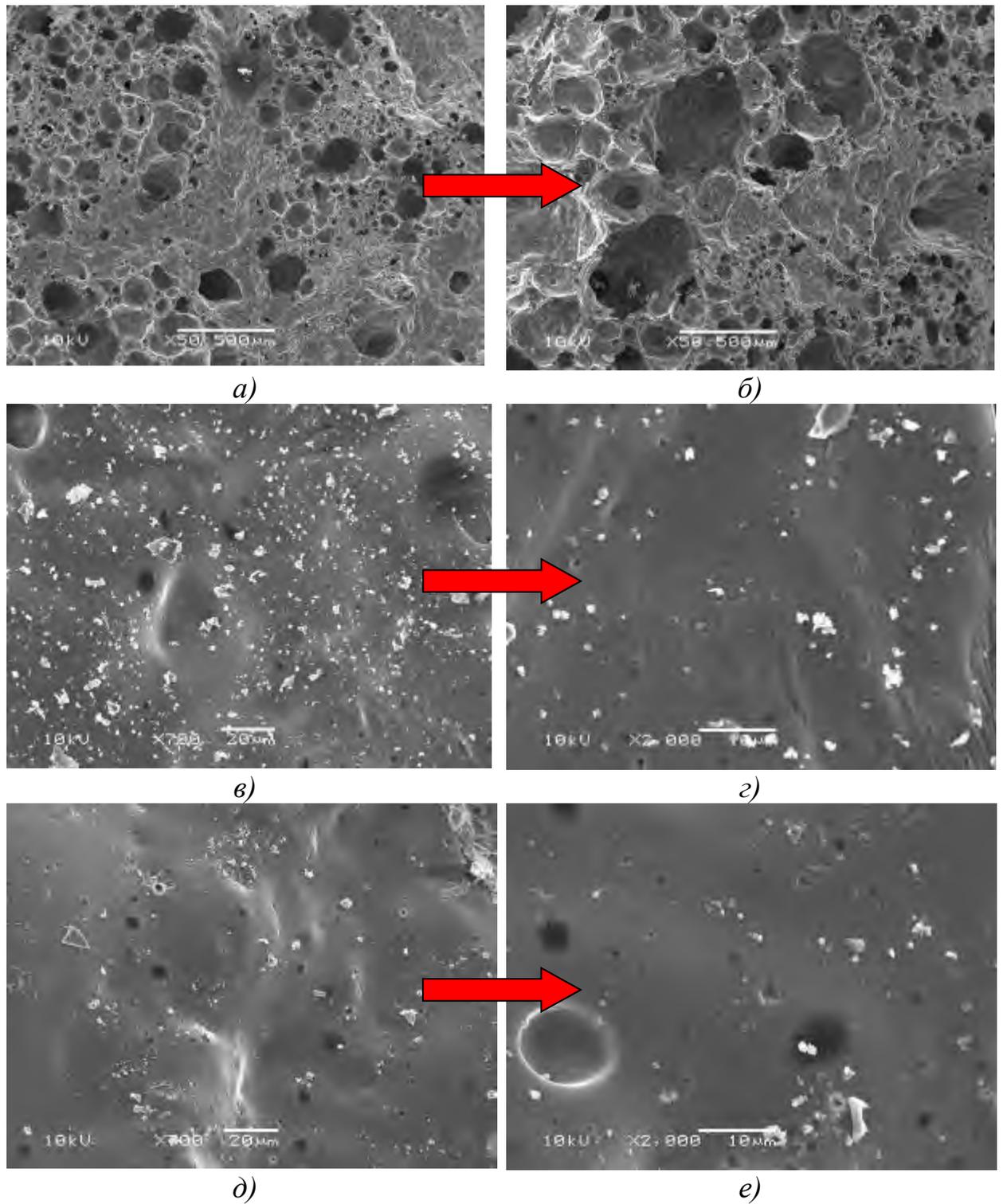
Вид пористого заполнителя	Масса до выдержки, г	Кол-во поглощенного СаО, г/мл.	Масса после выдержки, г	Изменение массы, %
Пеностекло (5-10 мм)	4,35	0,115	4,3	-1
Пеноцеолит (5-20 мм)		0,311	4,45	+2,3
Керамзит (5-10 мм)		0,050	4,3	-1

Для оценки активности поверхности пористых заполнителей по отношению к цементному раствору был проведен опыт, в котором исследуемые образцы были помещены в водоцементный раствор В/Ц=0,2. Образцы выдерживались в течение 28 суток. После этого образцы были высушены и подвергнуты контрольному взвешиванию до достижения постоянной массы.

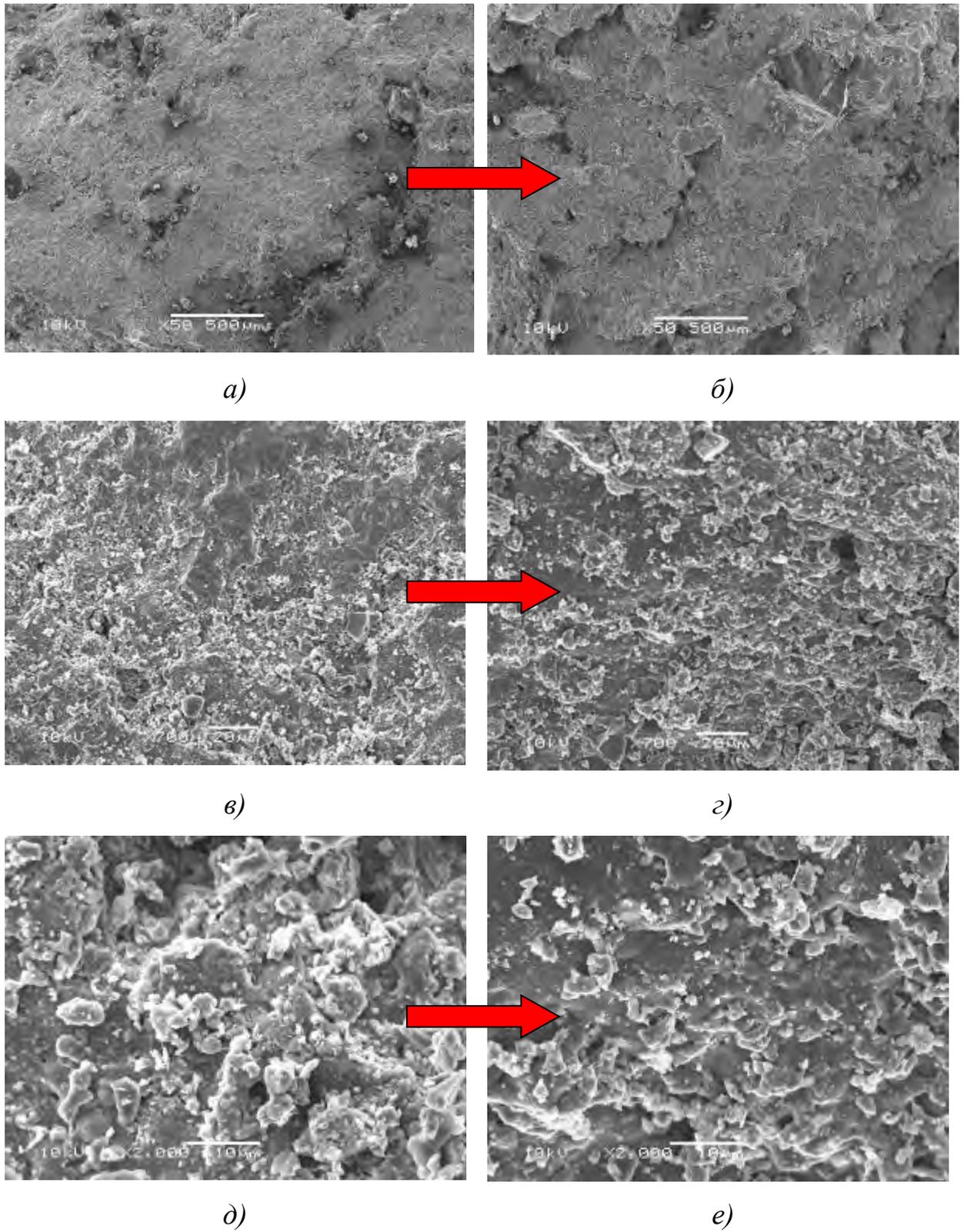
Для анализа изменения микроструктуры изучаемых пористых заполнителей была изучена морфология поверхностей до и после взаимодействия с цементным раствором с использованием метода растровой электронной микроскопии. На полученных микроснимках гранулированного пеностекла (рисунок 4.3) наблюдается отсутствие продуктов гидратации, что свидетельствует о пассивности поверхности заполнителя и отсутствием химического взаимодействия на границе раздела с цементным камнем, даже несмотря на наличие капиллярных каналов между ячейками заполнителя. Снижение массы пеностекла после взаимодействия с цементным раствором связано с уменьшением на его поверхности агрегированного вещества.

Микроструктура керамзитового гравия отличается плотной, слабо выраженной слоистой структурой, сопровождающейся неоднородностью гранулометрического состава (рисунок 4.4). Отсутствуют видимые новообразования гидратных фаз, не наблюдается химическая адгезия поверхности зерна к цементному раствору. Это связано с тем, что зерна керамзитового гравия, получаемые при высокотемпературном обжиге во вращающихся печах, покрыты окатанной спекшейся оболочкой, которая содержит малоактивный муллит. Это приводит к снижению сцепления керамзитового гравия с растворной частью бетона, так и активности его поверхности.

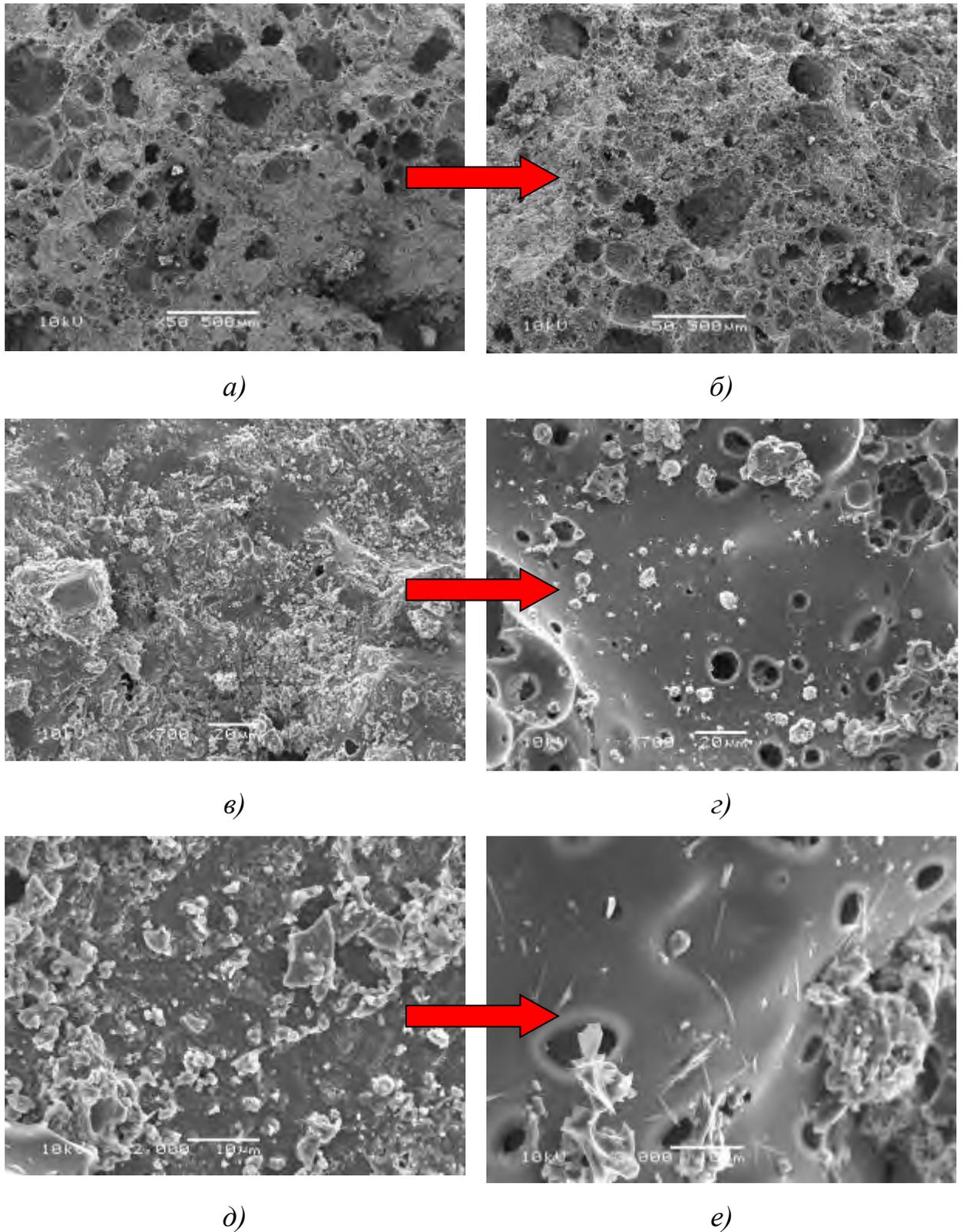
Наибольшей сорбционной способностью по отношению к СаО характеризуется пеноцеолит (таблица 4.2), о чем свидетельствует повышение массы образца после взаимодействия с цементным раствором. На микроснимках видны игольчатые кристаллические новообразования, свидетельствуя о протекании пуццолановой реакции между алюмосиликатными компонентами и цементным тестом (рисунок 4.5) [242].



**Рисунок 4.3** – Микроструктура поверхности гранулированного пеностекла:  
а), в), д) – исходный наполнитель; б), г), е) – после взаимодействия с  
цементным раствором



**Рисунок 4.4** – Микроструктура поверхности керамзитового гравия:  
*a), в), д)* – исходный заполнитель; *б), г), е)* – после взаимодействия с  
 цементным раствором



**Рисунок 4.5** – Микроструктура поверхности пеноцеолита:  
*a), в), д)* – исходный заполнитель; *б), з), е)* – после взаимодействия с  
 цементным раствором

Помимо развитой шероховатой поверхности, пеноцеолит имеет высокоразвитую пористую внутреннюю структуру, которая состоит из ячеек круглой формы. Развитая геометрия поверхности и микропористость зерен способствует хорошей адгезии к цементному камню, а равномерная ячеистая структура. На микроснимках в масштабе  $\times 700$  образцов пеноцеолита после взаимодействия с цементным раствором замечено образование пор на поверхности, что вероятно, говорит об расщеплении силановых связей кремнезема заполнителя под действием гидроксид-ионов, что возможно свидетельствует о протекании щелочно–силикатной реакции. Несомненно, подобное явление способствует разрыхлению структуры заполнителя и внедрению в него щелочных ионов. Однако в работе [243] отмечается, что подобная проблема актуальна при применении реакционных заполнителей в плотных бетонах, в частности в конструкционных бетонах, которые подвержены агрессивному воздействию окружающей среды.

Таким образом, на основе полученных данных отмечена перспективность использования пеноцеолита производства ООО «Сунтарцеолит» в качестве пористого заполнителя для легких бетонов.

#### **4.2. Оценка свойств золошлаковых отходов в качестве добавки для легкого бетона**

Поскольку пористый заполнитель является основным по объемному содержанию компонентов в бетоне, использование пуццолановых добавок, такие как золошлаковые отходы, в качестве микрозаполнителя могут рассматриваться как эффективное решение повышение физико-механических свойств [244].

С целью исследования возможности получения легкого бетона на композиционном вяжущем с пористым заполнителем ячеистой структуры из промышленных отходов были исследованы золошлаковые смеси (ЗШС) производства ООО «Якутский котловой завод» (г. Якутск), образующиеся в результате совместного удаления золы и шлака механическим способом в

процессе сжигания бурого угля Кангаласского месторождения. Однако оценка направления использования ЗШС возможна только после изучения ее состава их минеральной части. В таблице 4.3 представлен химический состав изучаемого ЗШС (ООО «Якутский котловой завод»). Технические характеристики ЗШС определялись по ГОСТ 25592–2019 "Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов. Технические условия" и представлены в таблице 4.4. Значение потери массы при прокаливании ЗШС определялась по ГОСТ 11022–95 «Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности».

**Таблица 4.3–** Химический состав золошлаковых отходов (ООО «Якутский котловой завод»)

Содержание оксидов, %													
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>
35,04	0,69	14,96	3,63	1,71	0,02	3,61	20,83	2,57	0,13	0,71	0	0,03	6,22

**Таблица 4.4–** Технические характеристики ЗШС (ООО «Якутский котловой завод»)

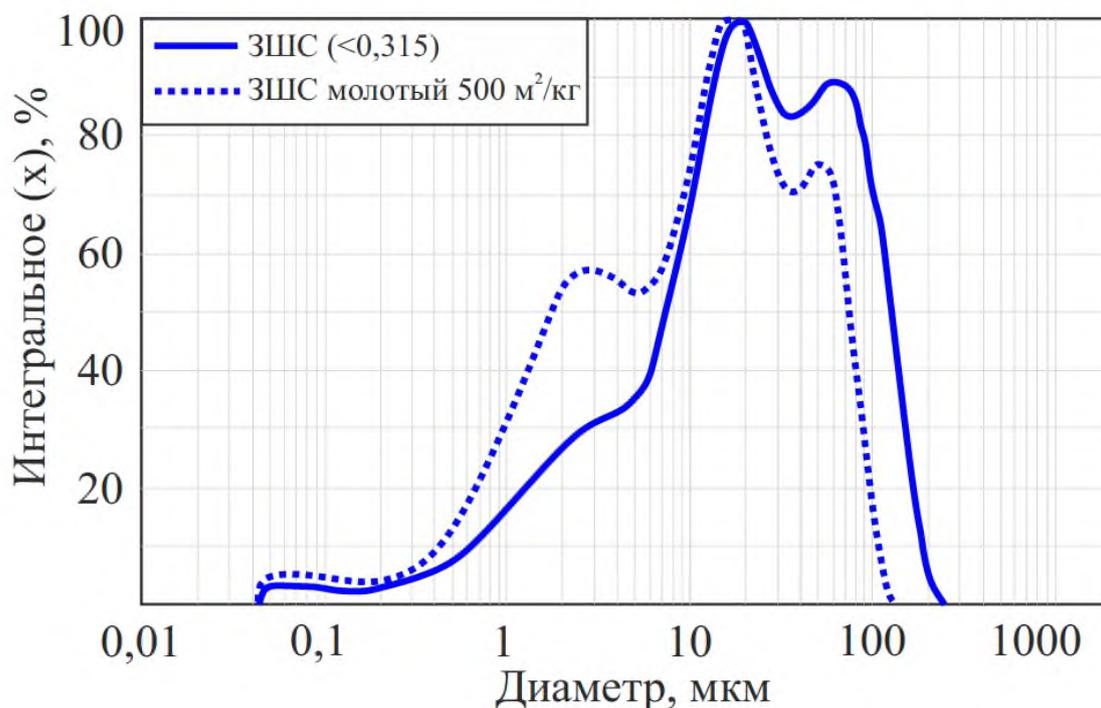
Показатель		Значение
Вид ЗШС	по виду сжигаемого угля	Буроугольный (Б)
	по химическому составу	Основные (О)
	по способу удаления	Сухой (С)
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>		1028
Модуль крупности, М <sub>к</sub>		0,789
Зольная составляющая (<0,315 мм)		84,2
Шлаковая составляющая (0,315–5 мм)		15,8
Потеря массы при прокаливании, %		16,3
Вяжущая активность АМД, МПа		4,5
Кол-во поглощенного СаО, мг СаО/г		30,3

На основе полученных значений, равные по содержанию  $\text{CaO}$ –20,8% и  $\text{SiO}_2$  –35,1%, изучаемый ЗШС относится к основным. Отмечается низкое содержание оксидов кремния  $\text{SiO}_2$ –35,1% и алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –14,96%, которые необходимы для пуццолановой реакции. Согласно технических требований ГОСТ 25592-2019, изучаемая ЗШС по виду сжигаемого угля относится к бурогольному (Б). Содержание  $\text{CaO}$  в исследуемых ЗШС, определенное в ходе химического анализа, превышает значение в 10%, установленное в качестве критерия классификации в ГОСТ 25592-2019. Полученный ЗШС по химическому составу классифицируется как основной (тип «О»). Исследуемый ЗШС удаляется посредством системы пневмотранспорта в золоотвал, что определяет его класс по способу удаления – сухой (С). ЗШС, являющийся вторичным минеральным ресурсом, по зерновому составу преимущественно характеризуется зольной составляющей, что определяет ее тип – минеральная добавка для бетона.

Определение гранулометрического состава представляет собой ключевой параметр, определяющий технологические и эксплуатационные свойства сырьевых материалов. Чем больше содержания микродисперсных частиц, тем выше становится пластичность материала [245]. Это обеспечивает высокое сцепление системы, что положительно скажется на прочностные характеристики готовых изделий. Результаты распределения частиц по размерам представлены на рисунке 4.6.

Анализ гранулометрического состава показал, что ЗШС, просеянный через сито 0,315 характеризуется двумя пиками в области 11 и 65 мкм, по сравнению с молотым до удельной поверхности  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$  ЗШС у которого наблюдается три пика в области частиц 2,8, 10,5 и 50 мкм, что говорит о его повышенной модальности. Размах частиц  $((d_{90}-d_{10})/d_{50})$  для сухой ЗШС ( $<0,315$ ) составляет 4,5 мкм, а для молотого ЗШС – 4,24 мкм. Большой размах и полифракционность просеянного ЗШС способствуют формированию плотной упаковки частиц, что ведет к снижению межзерновой пористости и

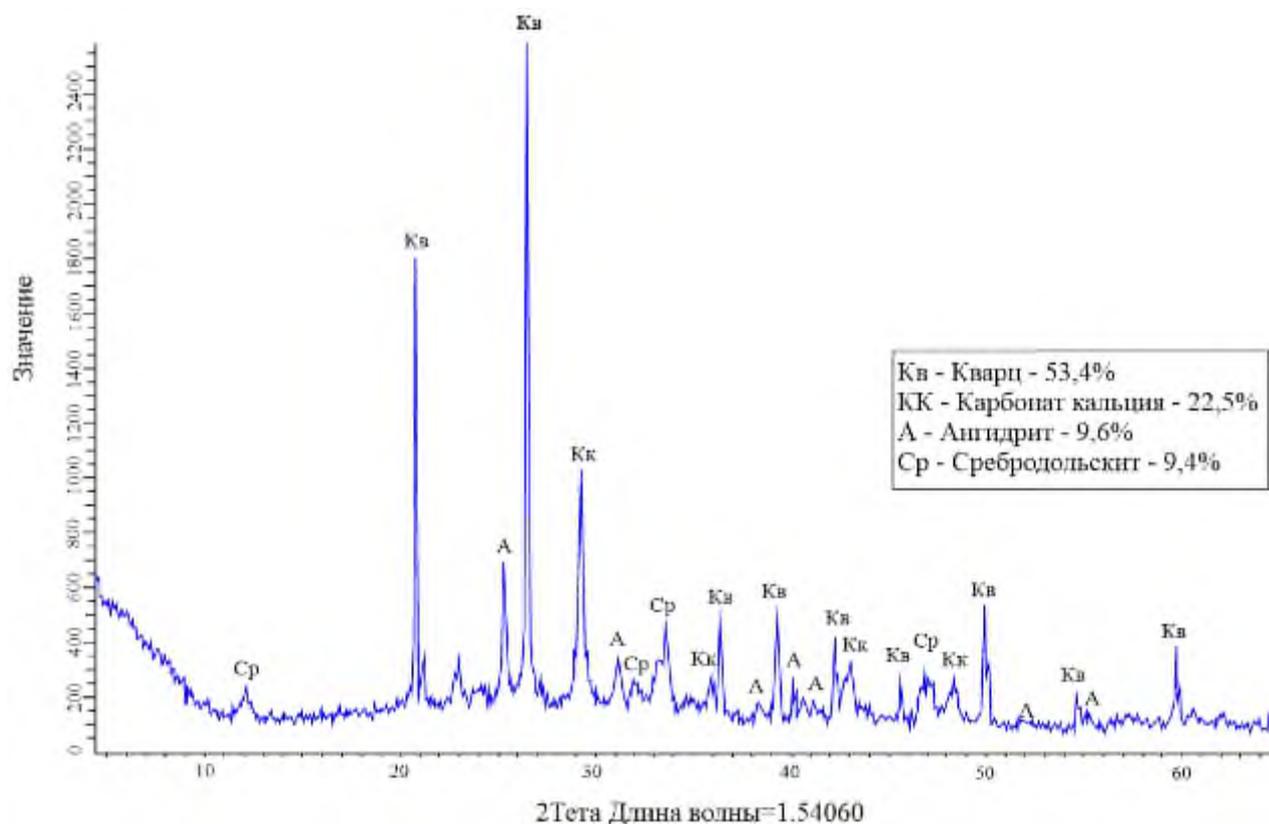
потенциально позволит уменьшить расход цемента, выступая в роли микронаполнителя, структурно уплотняющего цементную матрицу.



**Рисунок 4.6** – Гранулометрический состав ЗШС  
(ООО «Якутский котловой завод»)

Анализ минералогического состава, выполненный с помощью рентгенофазового анализа (рисунок 4.7), показывает в наибольших количествах присутствие кварца, содержание которого составляет 53,4%, карбоната кальция – 22,5%, ангидрита – 9,6%, а также сребродольскита – 9,4%.

$\text{CaSO}_4$  – ангидриты, найденные в продуктах сжигания углей, образуются в топочной камере котлоагрегатов при взаимодействии частиц кальция, который содержится в золе, с серой топлива. В работе [246] утверждается, что при температуре обжига от  $320^\circ\text{C}$ , ангидрит  $\text{CaSO}_4$  переходит в нерастворимый «намертво обожжённый» вид, который практически не взаимодействует с водой и не твердеет. Кислосодержащие соединения кальция-ферритов (сребродольскит и ангидрит), являющиеся результатом контакта силикатных и карбонатных пород, «работают» как геохимические барьеры [247].

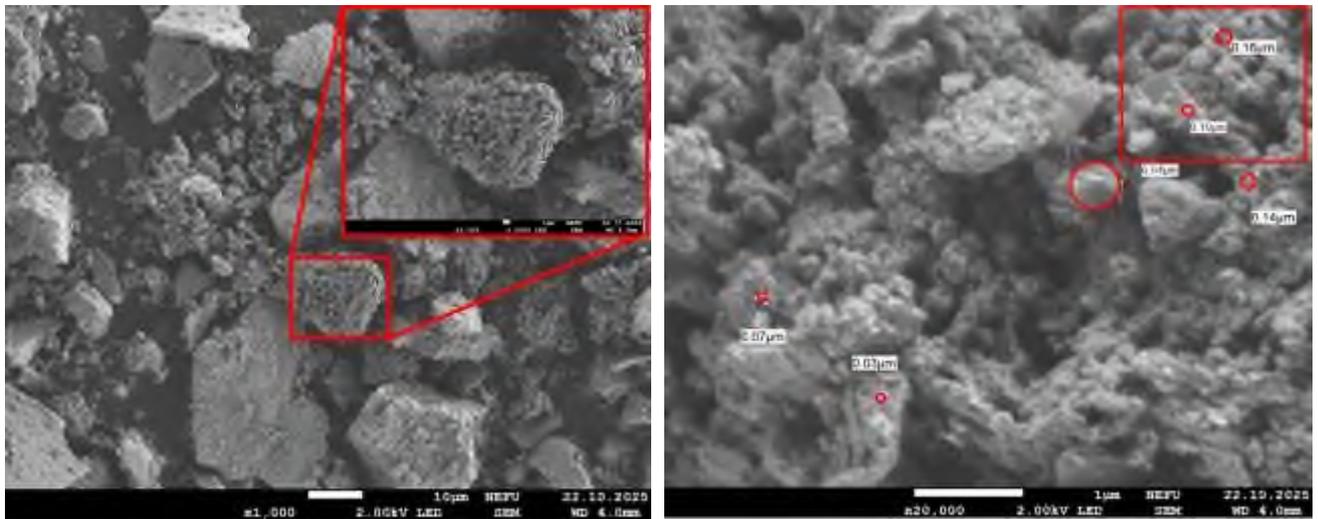


**Рисунок 4.7** – Минералогический состав ЗШС  
(ООО «Якутский котловой завод»)

Микроснимки полученных золошлаковых отходов после его сжигания в котельной ООО «Якутский котловой завод» в различных масштабах представлены на рисунке 4.8.

Анализируя полученные микроснимки очень сложно разглядеть зольные алюмосиликатные микросферы, их очертания проявляются лишь в наномасштабе с размерами микросфер около 100 нанометров. Наблюдается наличие карбонатных обломков  $\text{CaCO}_3$ , а также продукты низкотемпературных превращений. Содержание более 50% кварца говорит о том, что полученная ЗШС характеризуется низкой температурой плавления в процессе горения в топке. Также содержание карбоната кальция в ЗШС, равное 22,5% свидетельствует о не достижении температуры его полного плавления, которое находится в диапазоне 600 до 1000°C [248]. Это объясняется тем, что горение угля на предприятии ООО «Якутский котловой завод» происходило в котлах длительного горения, для которых характерен дефицит кислорода и отсутствие

открытого горения в топке, называемое диффузионно-кинетическим горением [249].



*a)*

*б)*



*в)*

**Рисунок 4.8** – Микроструктура поверхности ЗШС в масштабе:

*a)* –  $\times 1000$ ; *б)* –  $\times 20000$ ; *в)* –  $\times 50000$

Таким образом, золошлаковая смесь, образованная в ходе диффузионно-кинетического горения бурого угля в условиях недостатка воздуха в топке котлов длительного горения ООО «Якутский котловой завод», по своему химическому составу и характеру влияния на цементную матрицу не проявляет пуццолановых реакций, следовательно является инертной. Золошлаковая смесь

характеризуется как полифракционная добавка, структурно уплотняющая цементный камень в качестве микронаполнителя. На основании полученных результатов изучаемая золошлаковая смесь имеет преимущество не в реакционной способности, а в физическом присутствии в структуре бетона, как структурообразующий компонент.

#### **4.3. Выбор и оценка основных свойств пенообразователей**

Не вызывает сомнения актуальность получения новых строительных материалов, отличающиеся высокими теплотехническими свойствами и высокими физико-механическими показателями, для снижения энергоемкости и стоимости строительного производства [250]. В качестве одного из вариантов, направленных на получения таких материалов, является целенаправленная поризация цементной матрицы путем введения пены, которая играет ключевую роль в формировании качественной ячеистой структуры композита [194, 251]. Несмотря на влияние множества факторов, определяющих свойства бетонов с ячеистой структурой, необходимо выделить качество и стабильность пены [252].

В условиях действующих производств и рейтингов на строительном рынке были исследованы пенообразователи торговых марок «Rospena» (Россия), «FoamСem» (Италия), представляющие собой пеноконцентрат на базе белка, а также синтетический пенообразователь торговой марки «ПБ–2000» (Россия), состоящий из смеси анионоактивных ПАВ со стабилизирующими и функциональными добавками. Из анализа последних исследований, учеными из БГТУ им. В.Г. Шухова, в рамках научных исследований по оценке свойств пенообразователей, отмечена высокая стойкость белковых пенообразователей в диапазоне концентраций от 6–16%, максимальная стойкость синтетических пенообразователей в пределах 1–2% концентрации [253].

Технические характеристики исследуемых пенообразователей приведены в таблице 4.5. Оценка свойств пенообразователей, методика определения которых отражена в таблице 4.6, проводилась по критериям: кратности,

стойкости пены во времени, стойкости пены в растворе и в легком бетоне, стоимости. Приготовление пены выполнялось в течение 4 минут с использованием высокооборотного миксера со скоростью 3000 об/мин до формирования одностойкой пены. Начальная концентрация пенообразователя для трех изучаемых торговых марок составляет 2%. Далее концентрация повышается с шагом 2% до достижения максимального значения в 10%.

**Таблица 4.5**– Технические характеристики пенообразователей

Торговое название пенообразователя	Тип	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водородный показатель, pH
FoamСem	протеиновый	1140-1200	6,7 ± 0,3
ПБ-2000	синтетический	1000-1200	7,0 ± 1,0
Rospena	протеиновый	1000-1100	6,7 ± 0,3

**Таблица 4.6**– Методика определения показателей пенообразователей

№ п/п	Определяемый показатель	Метод определения	Составляющие
1	Кратность пены, $K$	$K = \frac{V_{\Pi}}{V_{\Pi O}}$	$V_{\Pi}$ - объем полученной пены, л; $V_{\Pi O}$ - объем раствора пенообразователя из которого была получена пена, л.
2	Стойкость пены во времени, мин	Время выделения из пены жидкости в количестве 50% от раствора пенообразователя [194]	-
3	Стойкость пены в поризованном растворе, $C_{\text{ЦТ}}^{\Pi}$	$C_{\text{ЦТ}}^{\Pi} = \frac{V_{\text{ЦТ}}^{\text{ПОР}}}{V_{\text{ЦТ}} + V_{\text{ПЕН}}}$	$V_{\text{ЦТ}}^{\text{ПОР}}$ - объем полученного поризованного теста, л; $V_{\text{ЦТ}}$ - объем цементного теста, л; $V_{\text{ПЕН}}$ - объем пены, л.

№ п/п	Определяемый показатель	Метод определения	Составляющие
4	Стойкость пены в поризованном растворе пористым заполнителем, $C_{ЦТ+ПЗ}^П$	$C_{ЦТ+ПЗ}^П = \frac{V_{ЦТ}^{ПЕН}}{V_{ЦТ+ПЗ} + V_{ПЕН}}$	$V_{ЦТ}^{ПОР}$ - объем полученного поризованного теста, л; $V_{ЦТ+ПЗ}$ - объем цементного теста с пористым заполнителем, л; $V_{ПЕН}$ - объем пены, л.
5	Стоимость, руб	На основании прайс-листа производителей	-

Согласно полученным результатам (рисунок 4.9 и 4.10), белковые пенообразователи «Rospena» и «FoamСem» обладают невысокими показателями кратности, по сравнению с синтетическим пенообразователем «ПБ–2000»: Rospena достигает кратности – 12,4 при концентрации 6%, а FoamСem при той же концентрации имеет показатель кратности – 12. ПБ–2000 достигает максимальной кратности – 18 при концентрации 6%, далее наблюдается резкое падение кратности. Отмечена максимальная кратность для всех рассматриваемых пен при концентрации пенообразователей – 6%.



а)



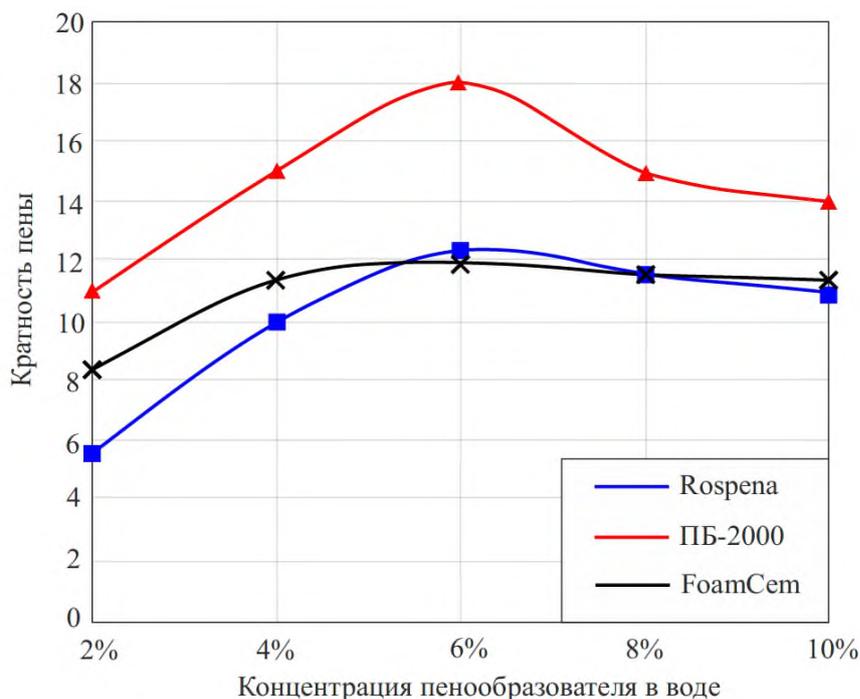
б)



в)

**Рисунок 4.9** – Столбы пен рассматриваемых пенообразователей с заданными концентрациями:

а) – FoamСem; б) – Rospena; в) – ПБ–2000

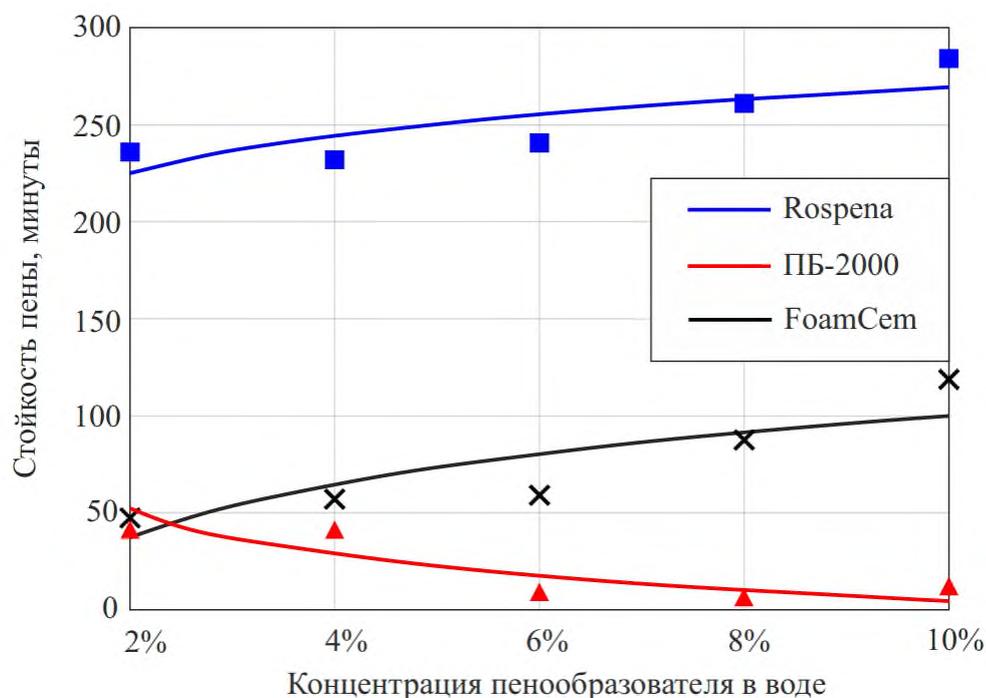


**Рисунок 4.10** – Кратность пен в зависимости от концентрации и вида пенообразователя

По результатам изучения стойкости пены, в зависимости от концентрации пенообразователя (Рисунок 4.11), самой длительной стойкостью характеризуется пенообразователь торговой марки «Rospena». Опять же у белковых пенообразователей, по мере увеличения концентрации ПАВ сохраняется положительная динамика в повышении стойкости пены. ПБ–2000, обладающий наивысшей кратностью, продемонстрировал самую низкую стойкость среди исследуемых видов пенообразователей. На основании результатов, показанных на рисунках 4.10 и 4.11, для дальнейших исследований для всех пенообразователей принимается концентрация – 6%.

Стойкость в поризуемом растворе определялась по методике [193]. Раствор состоит из портландцементного раствора и композиционного вяжущего ТМЦ–85. Суть данного метода заключается в способности поризующих компонентов стабилизировать ячеистую структуру пеномассы в процессе ее затворения и смешения с вяжущим. Критическим показателем является стойкость пены. Значение этого параметра ниже 0,8 свидетельствует о

дестабилизации структуры и коалесценции пузырьков, что приводит к неконтролируемому уплотнению смеси, указывающий на недостатки компонентов смеси. Пену следует считать удовлетворительной при значении  $C_{ЦТ}^{II}=0,8-0,85$ , качественной при  $C_{ЦТ}^{II}>0,95$ .



**Рисунок 4.11** – Стойкость пен в зависимости от концентрации и вида пенообразователя

Значение влияния пористого заполнителя на стабильность ячеистой структуры  $C_{ЦТ+ПЗ}^{II}$  была определена, на основе базовых принципов вышеописанной методики. Так после приготовления пеномассы в нее вводили цементный раствор (50% цементное тесто, 50% пеноцеолит). Данный опыт позволяет оценить дестабилизирующее влияние заполнителей на свойства пены.

На основе результатов по стойкости в цементном растворе (таблица 4.7), рассматриваемые пенообразователи ПБ–2000, FoamCem характеризуются низкими значениями стойкости пены, равными 0,9 и 0,92 соответственно. Значение  $C_{ЦТ+ПЗ}^{II}$  для ПБ–2000, FoamCem свидетельствуют о максимальном деструктивном воздействии пеноцеолита на поризованных раствор.

Полученные значения доказывают низкую стойкостью пены ПБ–2000, FoamСem. Для торговой марки Rospena  $C_{цт}^п=0,95$ ,  $C_{цт+пз}^п=0,75$ , характеризующие ее как качественной.

**Таблица 4.7**– Стойкость пены в различных поризованных растворах

Пенообразователь	ПБ–2000	Rospena	FoamСem
Концентрация ПО, %	6	6	6
$C_{цт}^п$	0,9	0,95	0,92
$C_{цт+пз}^п$	0,7	0,75	0,73

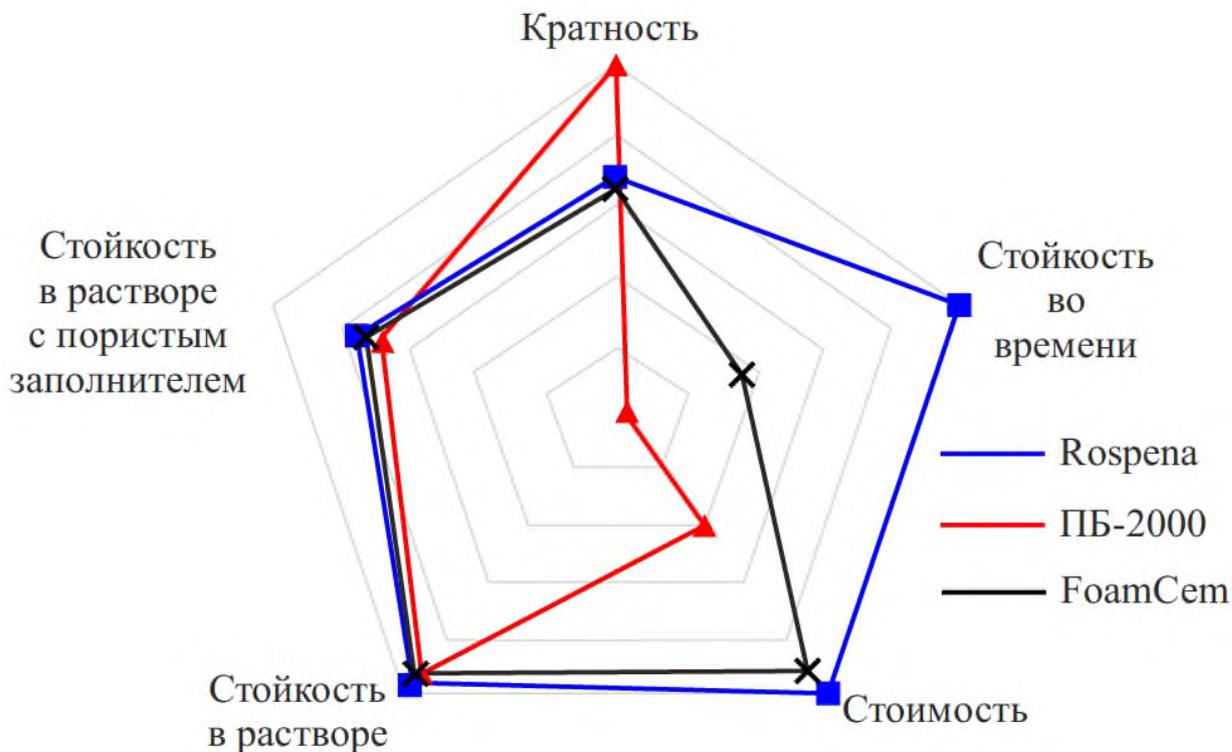
Для того, чтобы оценить эффективность пенообразователей по различным критериям с последовательностью ранжирования, значения определенных показателей были переведены в относительные, при этом наилучшие значения были взяты за максимальные (таблица 4.8).

**Таблица 4.8**– Стойкость пен в относительных величинах

Название ПО	Кратность пены, %	Стойкость пены в растворе, %	Стойкость в растворе с пористым наполнителем, %	Стойкость во времени %
ПБ–2000	100	94,73	93,33	3,3
Rospena	68,88	100	100	100
FoamСem	66,6	96,84	97,3	25,2

Согласно вышеуказанной таблице, можно выделить наиболее эффективный пенообразователь – белковый пенообразователь торговой марки «Rospena», который лидирует по трем показателям, первый – по стойкости пены в растворе, второй – по стойкости в растворе с пористым наполнителем, третий – по стойкости во времени. Общий результат изучения

пенообразователей визуализирован в виде лепестковой диаграммы, которая доказывает об эффективность Rospena в технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе (рисунок 4.12).



**Рисунок 4.12** – Свойства пен в зависимости от пенообразователя

Таким образом несмотря на высокую кратность пены на основании синтетического пенообразователя ПБ–2000, она обладает самой низкой стойкостью по времени среди рассматриваемых пенообразующих добавок. Белковые пенообразователи FoamCem и Rospena обладают приблизительно равными показателями по кратности пены, с некоторым преимуществом Rospena. Однако высокая стойкость пены в растворе, а также в растворе с пористым заполнителем на основе Rospena делает его наиболее эффективным пенообразователем. Проанализированные пенообразователи проранжированы по эффективности от менее эффективного к более в следующей последовательности: ПБ–2000 → FoamCem → Rospena.

#### **4.4. Физико-механические и теплотехнические характеристики легкого бетона на пористом заполнителе в зависимости от состава**

Результаты исследований, изложенные в главе 3, подтвердили эффективность природного цеолита месторождения Хонгуруу как компонента композиционного вяжущего. На его основе разработано композиционное вяжущее ТМЦ–85 с применением портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н. Следующим шагом данной работы является применение композиционного вяжущего, характеризующийся активностью 37,9 МПа, для производства легкого бетона ячеистой структуры, достигаемой за счет применения пенообразователя торговой марки «Rospena», на пористом заполнителе – пеноцеолите. В качестве структуроформирующего компонента принят полифракционный ЗШС ООО «Якутский котловой завод».

Состав легкого бетона на основе композиционного вяжущего с пористым заполнителем в разработке выбран для плотности D900. Рациональная дисперсность композиционного вяжущего, получаемого совместным помолом природного цеолита и портландцемента марки ЦЕМ 42,5Н, составляет порядка 500 м<sup>2</sup>/кг. В работе портландцемент заменен вяжущим ТМЦ–85.

Подбор состава бетона осуществлялся по рекомендациям к ГОСТ 27006–86 «Бетоны. Правила подбора состава» по подбору составов легких бетонов. Несмотря на то, что данная версия государственного стандарта была актуализирована в 2019 году, лишь к прежней версии нормативно-технической документации представлена действующая методика подбора конструкционно-теплоизоляционных бетонов с минеральными и химическими добавками. Для этого было проведено матричное двухфакторное планирование эксперимента, в качестве варьируемых параметров выступали объемная пеноцеолита, и плотность цементной матрицы (таблица 4.9). При этом плотность матрицы регулировалась двумя способами: введением ЗШС и пены.

Согласно матрице планирования (таблица 4.10), в лабораторных условиях было приготовлено 9 предварительных составов для дальнейшего математического планирования эксперимента (таблица 4.11). При каждом

значении варьируемых факторов испытывалось по три образца для исключения получения случайных результатов. В качестве варьируемых параметров выступали объемная концентрация пористого заполнителя – пеноцеолита, и содержание золошлакового отхода. При этом оба параметра влияли на расчетную плотность растворной матрицы и содержание пены.

**Таблица 4.9**– Условие планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Объемная концентрация пористого заполнителя	$X_1$	0,53	0,56	0,59	0,03
Содержание ЗШО, %	$X_2$	7	14	21	7

**Таблица 4.10**– Условие планирования эксперимента

№ точки плана	Факторы	
	$X_1$	$X_2$
1	+1	+1
2	+1	0
3	+1	-1
4	0	+1
5	0	0
6	0	-1
7	-1	+1
8	-1	0
9	-1	-1

**Таблица 4.11**– Предварительные составы легкого бетона D900 на 1 м<sup>3</sup>

№ п/п	Объемная концентрация пеноцеолита	Плотность матрицы	ТМЦ–85, кг	ЗШО, %	Пена, л
1	0,59	1580	550	21	65
2	0,59	1520		14	76
3	0,59	1460		7	87
4	0,56	1480		21	109
5	0,56	1420		14	120
6	0,56	1360		7	131
7	0,53	1380		21	143
8	0,53	1320		14	154
9	0,53	1260		7	165

Важной частью технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе является способ замешивания компонентов и вид бетоносмесителей. Замешивание смесей осуществлялось на лабораторном смесителе с плавающими лопастями ЛБ-АБ-10 и гравитационном бетоносмесителе СБР132А (рисунок 4.13). Применение двух типов смесителей позволило оценить, как режим перемешивания компонентов сказывается на качестве бетонной смеси.



а)



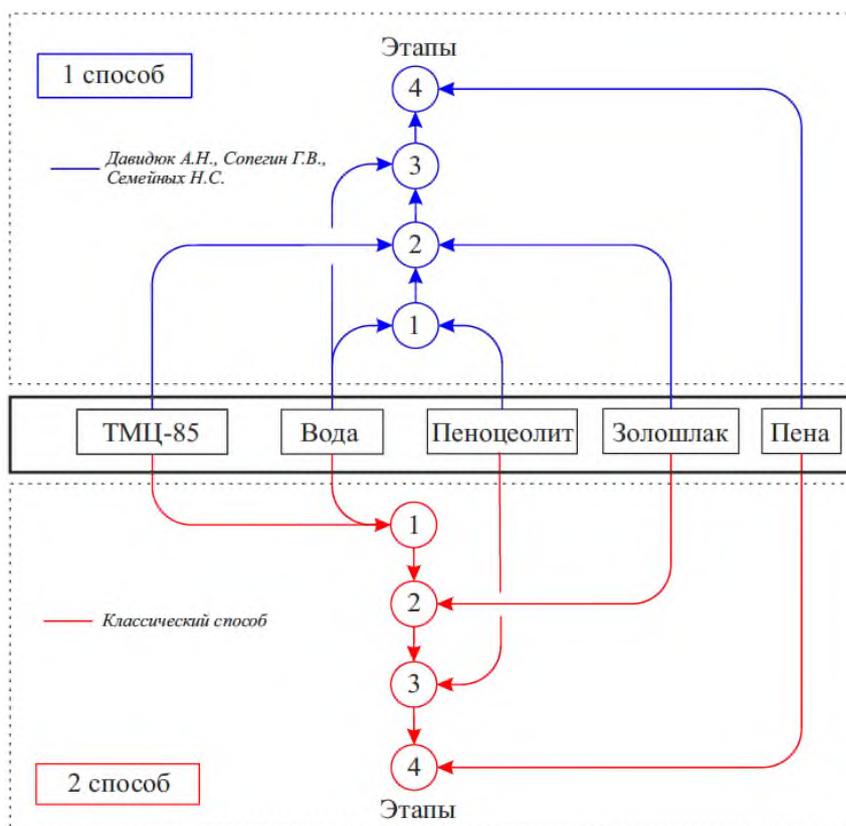
б)

**Рисунок 4.13** – Смесители принудительного действия:

а) – ЛБ-АБ-10; б) – СБР132А

Неудовлетворительными оказались смеси, получаемые с помощью лабораторного смесителя ЛС-АБ-10 с плавающими лопастями. Визуально отмечено, что при перемешивании смеси пенообразователь не образует изолированные пузырьки, наблюдается эффект «гашения» пены, что приводит к вынужденному повышению В/Ц.

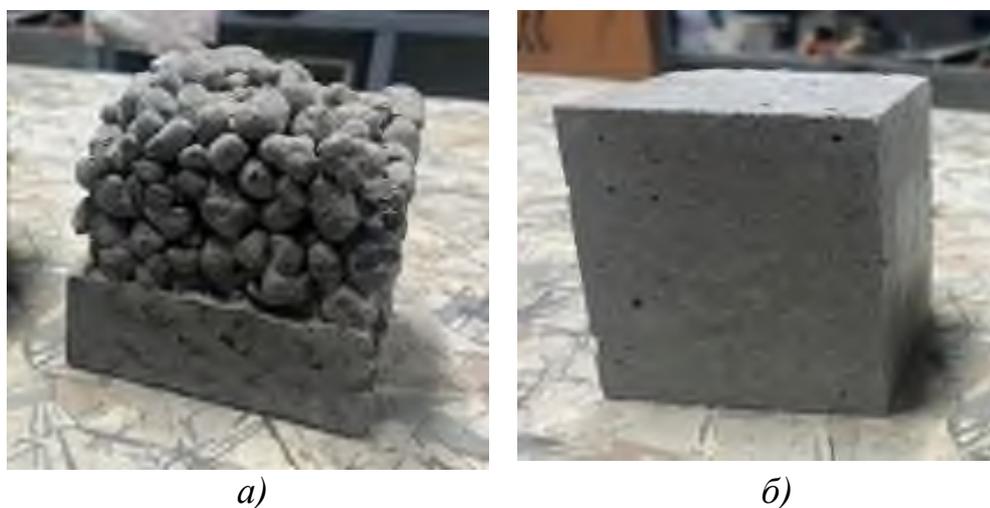
Далее приготовление и перемешивание смеси производилось в бетоносмесителе гравитационного типа и согласно способам, предложенным в источниках под авторством Давидюка А.Н., Сопегина Г.В. и Семейных Н.С. [80, 241]. Способ №1 получения ПЦБ подразумевает перемешивание компонентов в следующей последовательности: пеноцеолит вымачивается в 2/3 объема воды затворения в течение 5 минут, далее перемешивается с приготовленной смесью из сухих компонентов (рисунок 4.14). В образовавшуюся смесь вводилась оставшаяся часть 1/3 воды, далее пенообразователь.



**Рисунок 4.14** – Способы получения легкого бетона на пористом заполнителе

Применение данного способа подразумевает оптимальное смачивание поверхности пористого заполнителя, что минимизирует его водоотделение в процессе последующего перемешивания.

При формировании образцов произошло оседание раствора в нижнюю часть формы (рисунок 4.15). Предварительное замачивание пористого заполнителя усложняет технологию производства, а также приводит к снижению его прочности, а последующее введение воды затворения может снижать прочность бетона до 35% [254]



**Рисунок 4.15** – Лабораторные образцы ПЦБ с размерами 100x100x100

*a)* – способ №1; *б)* – способ №2

Согласно более классическому способу № 2 необходимо изначальное получение растворной смеси с последующей добавкой пористого заполнителя и пенообразователя. При этом, согласно наблюдениям, введение пены должно происходить после введения пористого заполнителя, так как если вводить пористый компонент в пенобетонную смесь, также будет происходить эффект «гашения» пены. Далее в работе приготовление образцов ПЦБ производилось по способу №2.

Физико-механические характеристики предварительных составов, выдержанных в естественных условиях твердения, приведены в таблице 4.12.

**Таблица 4.12**– Физико-механические характеристики предварительных составов легкого бетона D900 на 1 м<sup>3</sup>

№ п/п	Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Плотность матрицы, кг/м <sup>3</sup>	В/Ц	Возраст, сутки	Коэффициент конструкционного качества	Предел прочности при сжатии, МПа
1	822	1355	0,85	28	5,46	4,92
2	854	1435	0,65		6,94	6,25
3	879	1495	0,58		7,50	6,75
4	849	1357	0,80		5,93	5,34
5	902	1478	0,72		6,57	5,91
6	931	1544	0,65		6,62	5,95
7	921	1453	0,71		5,61	5,05
8	909	1428	0,68		5,94	5,35
9	943	1500	0,58		6,13	5,52

На основе полученных экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимостей.

Уравнение регрессии зависимости В/Ц легкого бетона от объемной концентрации пеноцеолита и плотности растворной части (4.1):

$$f(B / Ц) = -15,3 + 58,4X_1 - 0,087X_2 - 53,7X_1^2 + 0,17X_1X_2 + 0,0002X_2^2 \quad (4.1)$$

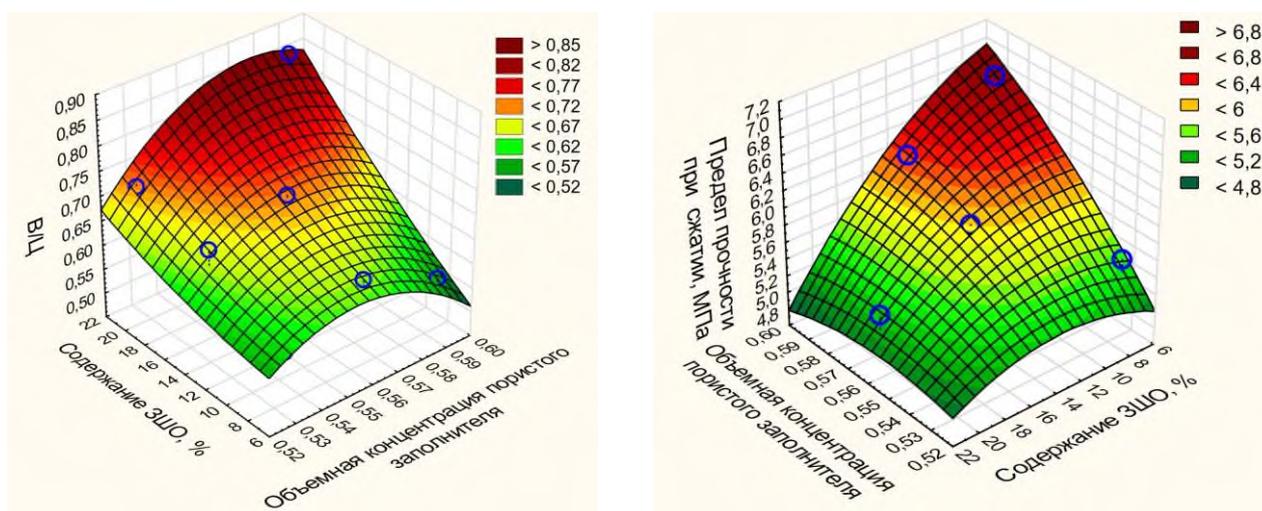
Уравнение регрессии прочности на сжатие легкого бетона от объемной концентрации пеноцеолита и плотности растворной части (4.2):

$$f(R_{сж}) = -45,56 + 149,9X_1 + 0,98X_2 - 103,7X_1^2 - 1,62X_1X_2 - 0,005X_2^2 \quad (4.2)$$

По полученным уравнениям регрессии построены номограммы зависимостей В/Ц (рисунок 4.16, а) и прочности на сжатие (рисунок 4.16, б) от объемной концентрации пористого заполнителя и содержания ЗШО, %.

В ходе проведения эксперимента установлено, что снижение массового содержания ЗШО и увеличение расхода пены в составе бетонной смеси приводит к снижению В/Ц. Рациональные прочностные характеристики достигаются при

увеличении концентрации пеноцеолита и увеличении плотности матрицы, пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и понижении В/Ц.

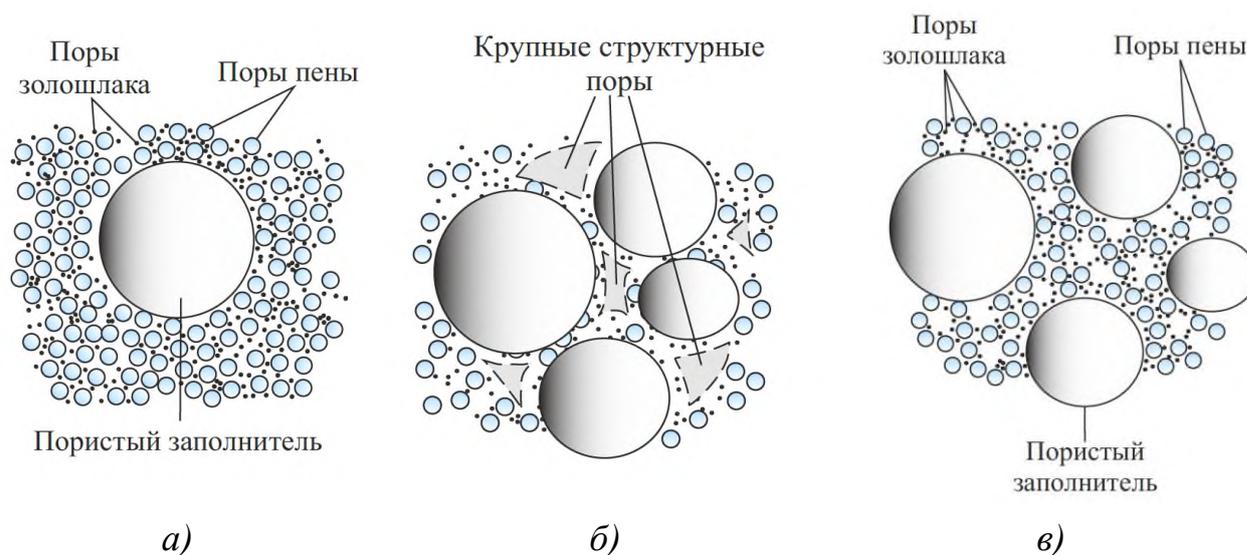


**Рисунок 4.16** – Зависимость В/Ц (а) и прочности на сжатие (б) легкого бетона от объемной концентрации пеноцеолита и содержания ЗШО, %

Таким образом предложена модель формирования рациональной структуры легкого бетона на крупном пористом заполнителе (кПЗ), обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности (рисунок 4.17).

Так, недостаточно высокая концентрация кПЗ (пеноцеолита) (рисунок 4.17, а) в лёгком бетоне приводит к тому, что для достижения целевой плотности необходимо увеличивать объем растворной части, что в условиях заданного объемного веса достигается снижением плотности раствора с помощью пеноагента, в следствии чего создаются концентраторы напряжений и снижается прочность. Недостаточная поризация растворной части (рисунок 4.17, б) будет приводить к перерасходу вяжущего и, тем самым, к повышению плотности, либо, при дефиците вяжущего, к формированию более крупных структурных пор, что вызывает еще более сильные концентраторы напряжений. Рациональное снижение плотности растворной части (рисунок 4.17, в) достигается не только поризацией пеноагентом, но и введением микропористого компонента – ЗШО, что позволяет повысить пористость цементирующей матрицы при уменьшении

количества концентраторов напряжений. При этом введение микропористого компонента регулируется его влиянием на В/Ц. Таким образом, для достижения наилучшей прочности легкого бетона с заданной плотностью необходимо закладывать высокую концентрацию кПЗ (пеноцеолита) и рационально подобранные количества пеноагента и микропористого компонента (ЗШО).



**Рисунок 4.17** – Модель формирования рациональной структуры легкого бетона на кПЗ:

- а) – низкая плотность растворной части с низкой концентрацией кПЗ;
- б) – повышенная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ;
- в) – рациональная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ

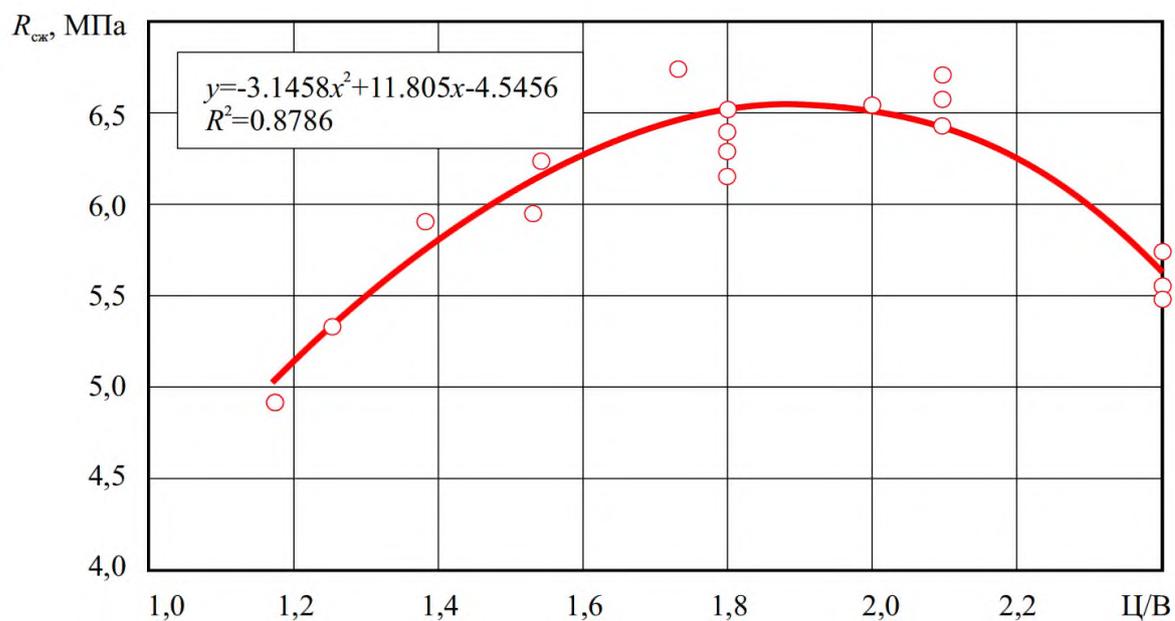
Далее произведен подбор состава по ГОСТ 27006-86, где за варьируемый параметр взято Ц/В отношение. Составы конструкционно-теплоизоляционного ПЩБ с применением композиционного вяжущего ТМЦ–85 приведены в таблице 4.12. Полученные физико-механические характеристики исследуемых образцов приведены в таблице 4.13, а полученная зависимость прочности легкого бетона на пористом заполнителе от Ц/В на рисунке 4.18. Микроструктура полученных ПЩБ представлена на рисунке 4.19.

**Таблица 4.12**– Составы конструкционно-теплоизоляционного ПЦБ с ТМЦ–85

№ состава	Маркировка	Ц/В	Вода, кг	ТМЦ–85, кг	Пористый наполнитель, кг	Цеолит, кг	ЗШС, кг	Пена, л	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
1	B5 F100 ПЗ D900	2,1	200	420	265	73	30	70	983
2		2,4		480		27	34	50	997
3		1,8		360		120	26	110	970

**Таблица 4.13**– Физико-механические свойства составов конструкционно-теплоизоляционных ПЦБ с ТМЦ–85

Номер состава	Маркировка	Средняя плотность бетона (кг/м <sup>3</sup> )	Средняя прочность при сжатии на 28 сутки твердения (МПа)
1	B5 F100 ПЗ D900	903	6,54
2		896	5,6
3		883	6,32

**Рисунок 4.18** – Зависимость прочности легкого бетона на пористом наполнителе от Ц/В



а)

б)

в)

**Рисунок 4.19** – Структура образцов приготовленного ППБ-бетона:

а) – низкая плотность растворной части с низкой концентрацией кПЗ;

б) – повышенная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ;

в) – рациональная плотность растворной части с высокой концентрацией кПЗ

Структура приготовленных образцов ППБ-бетона показывает характерное сходство с выше предложенной методикой формирования пористой матрицы. Образец на рисунке 4.19, а) характерен повышенной плотностью цементной матрицы. На рисунке 4.19, б) отчетливо наблюдаются признаки образования крупных структурных пор в цементной матрице. Фрагмент образца ППБ на рисунке 4.19, в) отражает равномерное распределение пористого заполнителя и характеризуется оптимальной поризацией цементной матрицы.

Результаты исследования зависимости Ц/В подтверждают валидность предложенной модели формирования пористой микроструктуры легкого бетона на пористом заполнителе (рисунок 4.17). Экспериментально подтверждено, что оптимальное значение Ц/В, соответствующей рациональной плотности цементной матрицы, составляет 2,0. При данном соотношении обеспечивается достижение максимальной прочности на сжатие, составляющая 6,49 МПа. Отклонение от оптимального значения Ц/В в сторону увеличения (до 2,4) приводит к снижению прочностных характеристик на 15%. Это обусловлено тем, что повышение плотности цементной матрицы нарушает рациональное распределение пор, делая структуру неэффективной со стороны физико-механической точки зрения. Таким образом, полученные данные не только

подтверждают предложенную модель формирования пористой структуры легкого бетона на крупном пористом заполнителе, но и количественно определяют границы ее практической реализации.

Испытание лабораторных образцов на морозостойкость (рисунок 4.20) производилось в соответствии с ГОСТ 25820-2021 «Бетоны легкие. Технические условия», ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по третьему ускоренному методу в климатической камере ЭКК-15.



**Рисунок 4.20** – Образцы ПЦБ в стальных кубических ванночках для испытания на морозостойкость:

*а)* – до загрузки в климатическую камеру; *б)* – после завершения цикла

Морозостойкость конструкционно-теплоизоляционного пеноцеолитбетона на основе ТМЦ–85 при средней плотности 883–903 кг/м<sup>3</sup> в ходе испытаний составила F<sub>100</sub><sup>1</sup>. По показателям морозостойкости легкие бетоны на пористых заполнителях соответствуют требованиям ГОСТ.

В таблице 4.14 отражен рациональный состав согласно матрице планирования.

<sup>1</sup>F<sub>100</sub> – марка по морозостойкости, соответствующее числу циклов, равное 3. Распространяется для всех видов бетонов, кроме бетонов дорожных и аэродромных покрытий, бетонов конструкций, эксплуатирующихся в минерализованной воде, и легких бетонов со средней плотностью менее D1500

**Таблица 4.14**– Физико-механические свойства составов конструкционно-теплоизоляционных ПЦБ

Состав смеси	Вяжущее	ТМЦ–85
	Вода, кг	225
	Ц/В	2
	Пеноцеолит/ЗШС, кг	265/30
	Пена, л	83
Физико-механические свойства бетона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	861
	Предел прочности при сжатии, МПа	6,49
	Марка по морозостойкости	F100
	Теплопроводность, Вт/(м °С)	0,18

Данные составы по своим техническим характеристикам удовлетворяют требованиям ГОСТ 25820–2021 «Бетоны легкие. Технические условия» для конструкционно-теплоизоляционных изделий: марке по плотности D900, классу по прочности до B5,0 и марке по морозостойкости F100.

Таким образом, установлен оптимальный способ получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями с использованием пористого заполнителя местного производства и композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгуруу.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимости прочности на сжатие. Установлена модель формирования пористой структуры легкого бетона на крупном пористом заполнителе, согласно которой для достижения максимальной прочности легкого бетона необходимо закладывать высокую концентрацию пористого заполнителя для обеспечения оптимальной пористости и прочности матрицы легкого бетона. При этом оптимальная плотность растворной части легкого бетона достигается

при оптимальном Ц/В. Математическое планирование позволило получить легкий пеноцеолитобетон на композиционном вяжущем ТМЦ–85 с прочностью 6,49 МПа.

Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой замешивания компонентов легкобетонной смеси должно начинаться с получения сначала растворной части, затем последовательного введения пористого заполнителя и пены. При этом перемешивание обеспечивается бетоносмесителем гравитационного типа.

Предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F100, теплопроводность в сухом состоянии  $\lambda = 0,18$  (м·°C/Вт), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам. В тоже время, похожий пеноцеолитобетон с максимальной достигнутой маркой по плотности D600, разработанный и изученный в рамках исследования под руководством А.Е. Местниковым [4], имеет показатель прочности на сжатие – 2,86 МПа.

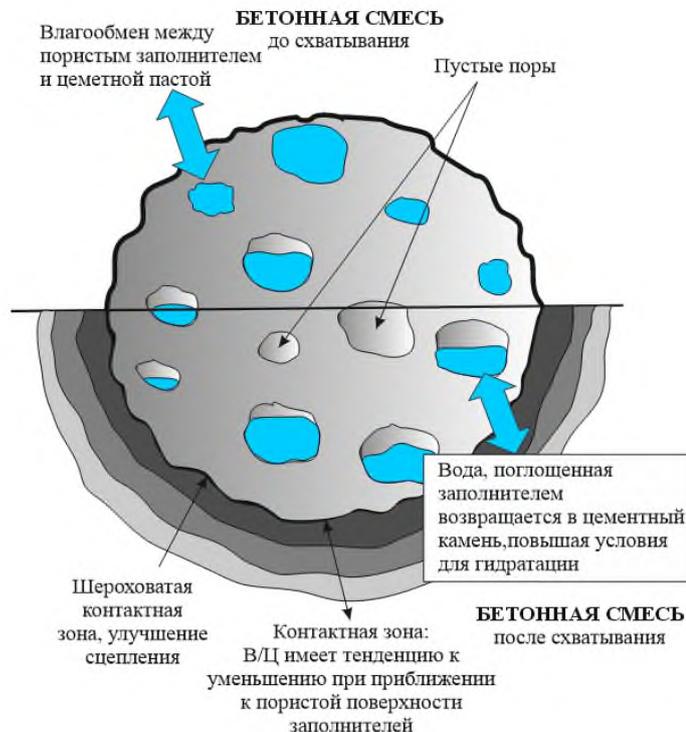
#### **4.5. Микроструктура синтезированной пористости легкого бетона на крупном пористом заполнителе**

Эксплуатационные свойства легких бетонов ячеистой структуры сильно зависят от параметров порового пространства. Введенный природный цеолит месторождения Хонгуруу, как показано в предыдущей главе, участвует в гидратационных процессах твердения вяжущего и влияет на показатели морозостойкости. Это можно объяснить изменением микроструктуры порового пространства и межпоровых перегородок. Для изучения природы формирования порового пространства были изучены макро- и микроструктурные особенности образцов пеноцеолитбетона с низкой, повышенной и рациональной плотностью растворной части с концентрацией пеноцеолита, согласно предложенной модели формирования пористой структуры легкого бетона, описанной ранее.

Как показано в работе С.В. Лахтариной [254], традиционная стратегия повышения физико-механических характеристик бетона за счет повышения плотности и жесткости цементной матрицы имеет существенный недостаток – повышение риска возникновения трещинообразования в ранних сроках твердения.

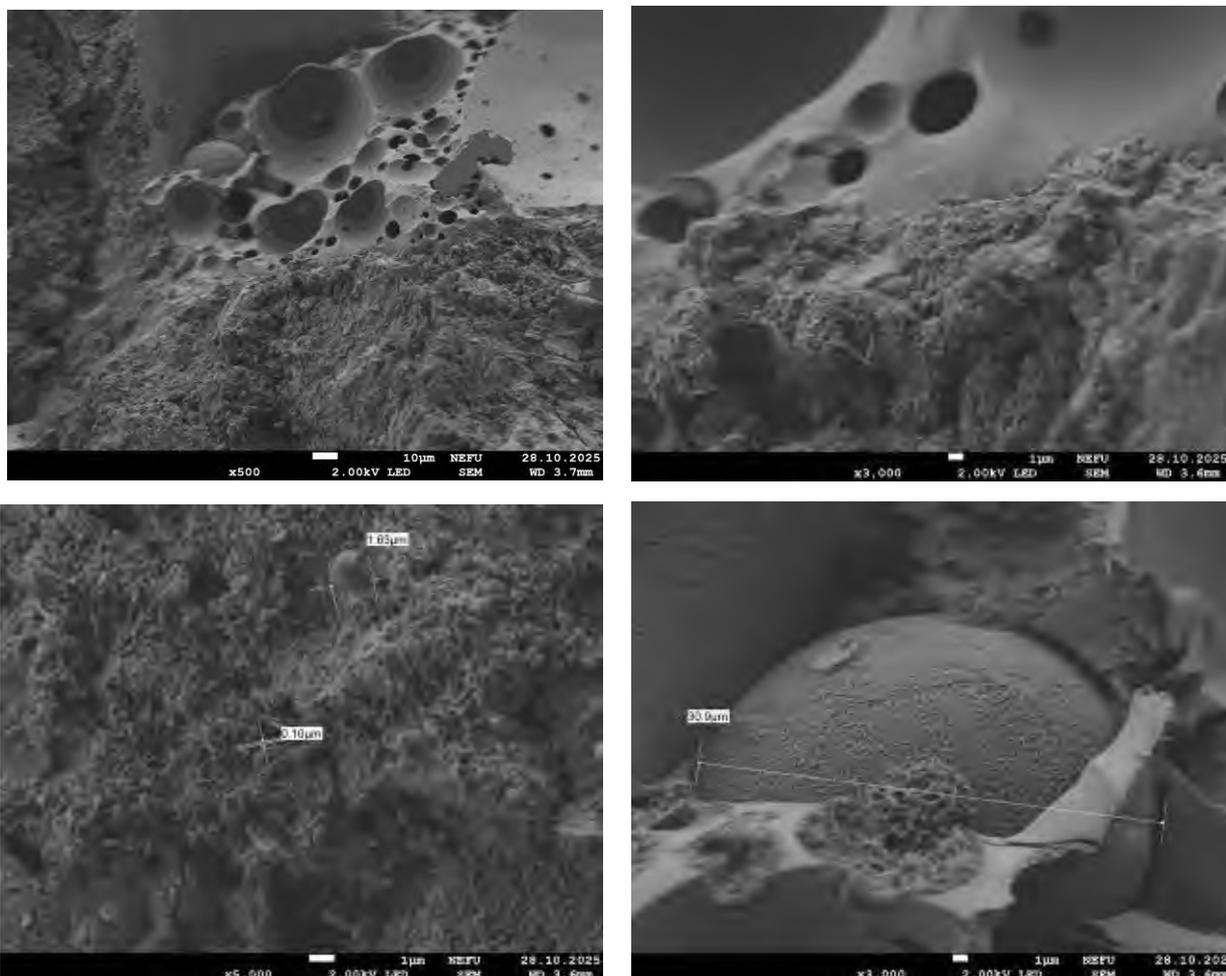
В процессе приготовления легкого бетона на пористом заполнителе изначально после затворения водой происходит ее миграция из растворной части в зерна крупного пористого заполнителя (рисунок 4.21). Далее в процессе твердения происходит обратная миграция воды затворения на поверхность контактной зоны за счет развития в основном осмотического давления [255].

Как отмечается в работе [242], легкобетонную смесь на этапе формирования микроструктуры принято рассматривать как саморегулирующуюся систему. Активный влагообмен продолжается до достижения равновлажностного и равновесного с окружающей средой состояния, называемый законом маятника.



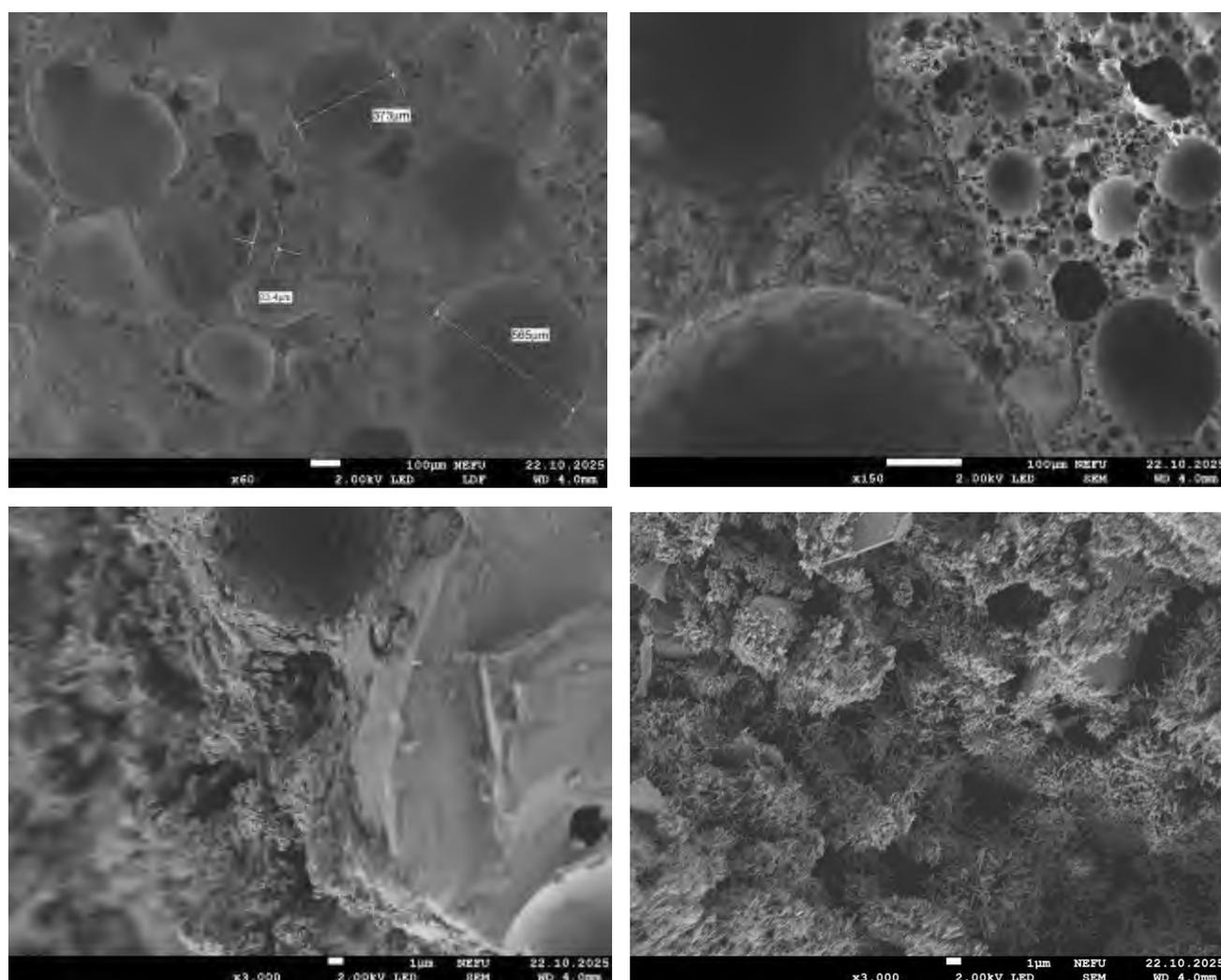
**Рисунок 4.21** – Характеристика контактной зоны с пористым заполнителем

Анализ микроснимков ПЦБ с низкой плотностью растворной части (рисунок 4.22) показывает отсутствие видимой пористости на границе раздела фаз, свидетельствуя об интенсивном влагообмене в ранние сроки гидратации. Пористый заполнитель, впитав в себя некий объем воды, выступает в роли аккумулятора влаги, который способствовал уплотнению приконтактной зоны. Наблюдается наличие игольчатых кристаллов (до 10 нм) высокоосновного гидросиликатного геля. Обнаруженное в порах заполнителя плотное сферическое образования диаметром 30,9 нм является следствием капиллярной гидратации поглощенной воды, способствующее формированию дополнительной прочности в собственных порах.



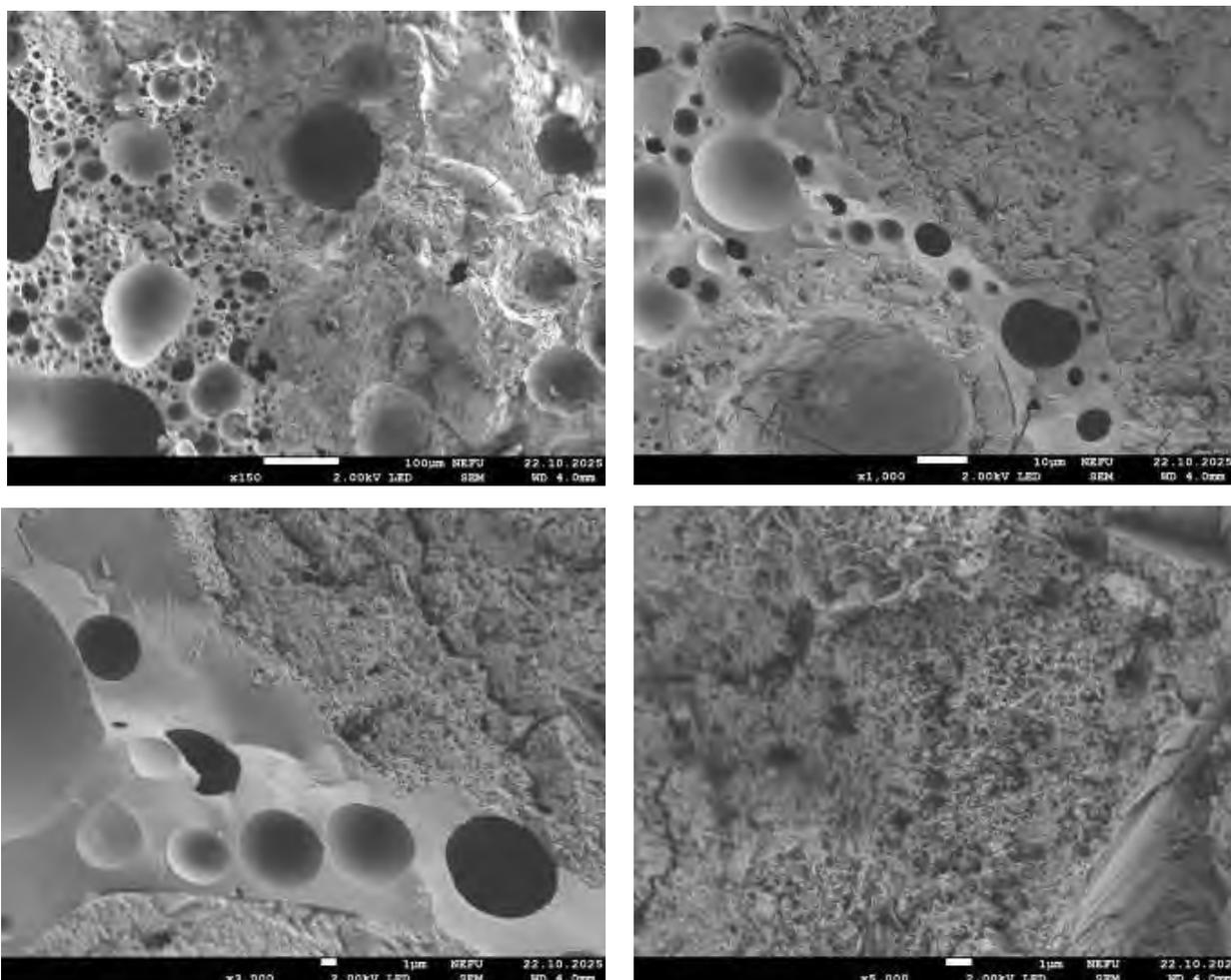
**Рисунок 4.22** – Микроструктура образцов ПЦБ-бетона низкой плотности растворной части с низкой концентрацией пористого заполнителя

На рисунке 4.23 обнаружены крупные структурные поры, диаметры которых достигают от 373 до 565 нм, а также сопутствующие им рыхлые провалы. Это, вероятно, связано с эффектом коалесценции мелких пор и образованию макродефектов в виде микротрещин, которые ослабляют контактную зону между пористым заполнителем и цементным тестом. Несмотря на деструктивное воздействие отмеченных явлений наблюдается формирование плотно сложенных игольчатых кристаллов С-S-H геля. Это доказывает решающую роль плотности цементной матрицы на макро- и микроуровне.



**Рисунок 4.23** – Микроструктура образцов ПЦБ-бетона повышенной плотности растворной части с высокой концентрацией пористого заполнителя

Анализ микроструктуры, представленной на рисунке 4.24, позволяет утверждать об формировании качественной ячеистой структуры композита. Матрица характеризуется равномерным распределением изолированных пор равноразмерного диаметра, которые не выступают концентраторами напряжений, сохраняя целостность всей матрицы. Видимых крупных структурных пор и очагов обвалов не обнаружено, что свидетельствует о механической целостности материала. В пространстве контактной зоны найдены игольчато-волокнистые кристаллы С-S-H геля, так и пластинчатые фазы, характерные для тобермита. При большем увеличении (x5000) видна внутренняя микропористость цементного камня.



**Рисунок 4.24** – Микроструктура образцов ПЦБ-бетона рациональной плотности растворной части с высокой концентрацией пористого заполнителя

Таким образом, анализ микроструктуры трех исследуемых образцов, представляющих варианты разработанной модели структуроформирования пористой структуры легкого бетона, показал, что в случае с низкой плотностью растворной части и высокой концентрацией пористого заполнителя наблюдается отсутствие видимой пористости на границе раздела фаз, свидетельствуя об интенсивном влагообмене в ранние сроки гидратации. В образце с высокой плотностью растворной части и высокой концентрацией пористого заполнителя наблюдаются крупные структурные поры, с диаметрами от 373 до 565 нм, а также сопутствующие им рыхлые провалы. Это, вероятно, связано с эффектом коалесценции мелких пор, которые приводят к образованию макродефектов в виде микротрещин, в виду появления высоких концентраторов напряжений, ослабляющие контактную зону между пористым заполнителем и цементным тестом. В случае достижения рациональной плотности растворной части с высокой концентрацией пористого заполнителя, формируется матрица с равномерным распределением изолированных пор равноразмерного диаметра. В пространстве контактной зоны найдены игольчато-волокнистые кристаллы C-S-H геля, так и пластинчатые фазы, характерные для тобермита. При большем увеличении ( $\times 5000$ ) видна внутренняя микропористость цементного камня.

#### **4.6. Выводы по главе 4**

1. Экспериментально установлено, что пористый заполнитель «пеноцеолит» на основе природного цеолита месторождения Хонгуруу, получаемый за счет интенсивного вспенивания шихты при температуре  $850^{\circ}\text{C}$ , обладает максимальной сорбционной способностью к CaO, что доказано увеличением массы образцов и подтверждено микроструктурным анализом. На поверхности заполнителя фиксируется образование игольчатых кристаллических гидратных фаз, что является свидетельством пуццолановой реакции между алюмосиликатным компонентом заполнителя и продуктами гидратации цемента. Это способствует повышению дополнительной активности контактной зоны «цементная матрица–пористый заполнитель».

2. Золошлаковая смесь, образованная в ходе диффузионно-кинетического горения бурого угля в условиях недостатка воздуха в топке котлов длительного горения ООО «Якутский котловой завод», по своему химическому составу и характеру влияния на цементную матрицу не проявляет пуццолановых реакций, следовательно является инертной. Золошлаковая смесь характеризуется как полифракционная добавка, структурно уплотняющая цементный камень в качестве микрозаполнителя. На основании полученных результатов изучаемая золошлаковая смесь имеет преимущество не в реакционной способности, а в физическом присутствии в структуре бетона, как структурообразующий компонент.

3. Несмотря на высокую кратность пены на основании синтетического пенообразователя ПБ–2000, она обладает самой низкой стойкостью по времени среди рассматриваемых пенообразующих добавок. Белковые пенообразователи FoamСem и Rospena обладают приблизительно равными показателями по кратности пены, с некоторым преимуществом Rospena. Однако высокая стойкость пены в растворе, а также в растворе с пористым заполнителем на основе Rospena делает его наиболее эффективным пенообразователем. Проанализированные пенообразователи проранжированы по эффективности от менее эффективного к более в следующей последовательности: ПБ–2000 → FoamСem → Rospena.

4. Установлен оптимальный способ получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями с использованием пористого заполнителя местного производства и композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгуруу. На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимости прочности на сжатие. Установлена модель формирования пористой структуры легкого бетона на крупном пористом заполнителе, согласно которой для достижения максимальной прочности легкого бетона необходимо закладывать высокую концентрацию пористого заполнителя для обеспечения оптимальной пористости и прочности матрицы легкого бетона. При этом оптимальная плотность растворной части легкого бетона достигается при оптимальном Ц/В. Математическое планирование позволило получить

легкий пеноцеолитобетон на композиционном вяжущем ТМЦ–85 с прочностью 6,49 МПа. Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой замешивания компонентов легкобетонной смеси должно начинаться с получения сначала растворной части, затем последовательного введения пористого заполнителя и пены. При этом перемешивание обеспечивается бетоносмесителем гравитационного типа. Предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F<sub>1</sub>100, теплопроводность в сухом состоянии  $\lambda = 0,18$  (м·°C/Вт), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам.

5. Анализ микроструктуры трех исследуемых образцов, представляющих варианты разработанной модели структуроформирования пористой структуры легкого бетона, показал, что в случае с низкой плотностью растворной части и высокой концентрацией пористого заполнителя наблюдается отсутствие видимой пористости на границе раздела фаз, свидетельствуя об интенсивном влагообмене в ранние сроки гидратации. В образце с высокой плотностью растворной части и высокой концентрацией пористого заполнителя наблюдаются крупные структурные поры, с диаметрами от 373 до 565 нм, а также сопутствующие им рыхлые провалы. Это, вероятно, связано с эффектом коалесценции мелких пор, которые приводят к образованию макродефектов в виде микротрещин, в виду появления высоких концентраторов напряжений, ослабляющие контактную зону между пористым заполнителем и цементным тестом. В случае достижения рациональной плотности растворной части с высокой концентрацией пористого заполнителя, формируется матрица с равномерным распределением изолированных пор равноразмерного диаметра. В пространстве контактной зоны найдены игольчато-волокнистые кристаллы C-S-N геля, так и пластинчатые фазы, характерные для тобермита. При большем увеличении (x5000) видна внутренняя микропористость цементного камня.

## **5 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕГКОГО БЕТОНА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА**

Эффективность применения легких бетонов зависит не только от плотностно-прочностных характеристик, а также от теплозащитных свойств, которые обеспечивают надежность при эксплуатации в экстремальных температурных условиях в условиях повышенного износа жилищно-коммунальной инфраструктуры.

### **5.1. Теоретическая оценка тепловой эффективности стеновых ограждений с применением легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита**

Создаваемый тепловой режим в помещениях оказывает существенное влияние на здоровье человека, т.к. большую часть времени человек проводит в зданиях [256, 257]. Ощущение комфортности по [258] зависит также от уверенности человека в безопасности пользования зданием. Данное условие также можно обеспечить, правильно подобрав строительные материалы, которые будут использованы при возведении здания. В Федеральном законе от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» прописано: «требования безопасности для гражданских зданий заключается в недопущении конденсации влаги на поверхности ограждающих конструкций». Это обусловлено, когда температура этих поверхностей не будет опускаться ниже точки росы внутреннего воздуха  $t_p$ , °С. «Современная строительная теплофизика должна решать не только проблемы повышения энергетической эффективности зданий» [259, 260], но и также заниматься вопросами прогнозирования теплового режима помещений в случае возникновения аварийных ситуаций в системах теплоснабжения [261, 262], особенно в условиях резко-континентального климата, характеризующейся экстремально низкими температурами и длительностью отопительного сезона.

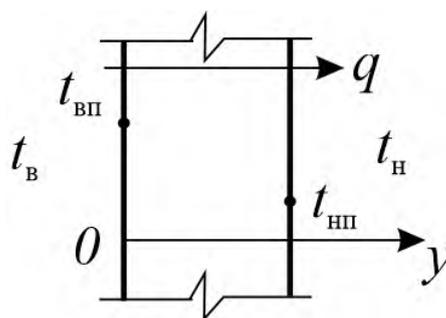
Стоит отметить, что применение легких бетонов на пористых заполнителях в качестве стенового материала позволит «повысить теплотехнические характеристики ограждающих конструкций» [263, 264].

На территории Якутии крупнейшими поставщиками тепловой энергии являются ГУП «Жилищно-коммунальное хозяйство Республики Саха (Якутия)», АО «Теплоэнергосервис», ПАО «Якутскэнерго», АО «Сахаэнерго», филиалы которых находятся в муниципальных образованиях региона. При этом согласно цифрам из Постановления Правительства Республики Саха (Якутия) №345 от 15.09.2021 года, в регионе отмечается высокий уровень износа систем коммунального хозяйства, более 50%, что позволяет утверждать о небезопасном уровне функционирования системы централизованного теплоснабжения в зимний период.

Сегодня не существует универсальной методики определения теплового режима помещения в случае возникновения аварийных ситуаций системы теплоснабжения, так как все больше рассматриваются отдельные факторы, влияющие на колебания температуры внутреннего воздуха, например, объемно-планировочные и конструктивные решения, текущее энергопотребление здания, назначение здания, технологические процессы, тип системы отопления и вид применяемого оборудования, теплоустойчивость многослойных ограждающих конструкций и т.д. Автор статьи [265] в рамках своего исследования теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций при нарушении работы систем теплоснабжения приходит к основному выводу о том, что при технико-экономическом сопоставлении материала конструкции стен здания нужно выбирать материалы с высокой теплоустойчивостью, что позволит сохранить допустимые температурные условия в аварийных случаях, а также обеспечить большее время для функционирования внутренних инженерных систем здания до устранения сбоев в работе систем теплоснабжения. Научные работники НИИСФ РААСН занимаются исследованием влияния различных факторов на определения характеристик теплопереноса в газонаполненных теплоизоляционных материалов [266–268]

На территории Якутии строительство частных деревянных домов в основном производится на сосновом бруссе с толщиной  $\delta=180$  мм без наружного утепления, что напрямую противоречит условиям тепловой защиты, описанной в СП 50.13330.2024 "СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий". При подключении зданий к централизованному теплоснабжению поставщик тепловой энергии обязывает собственников в утеплении зданий во избежание повышенных расходов тепловой энергии на компенсацию тепловых потерь. Однако, судя по наблюдениям, в частных секторах не все здания имеют внешнее утепление фасадной части, и они по сей день продолжают эксплуатироваться при центральном теплоснабжении.

Для зданий с однослойной наружной ограждающей конструкции схему переноса тепла можно представить по рисунку 5.1.



**Рисунок 5.1** – Схема описывающий перенос тепла через наружные ограждения ( $t_{в}$ ,  $t_{н}$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °C;  $t_{вп}$ ,  $t_{нп}$  – температуры внутренней и наружной поверхностей ограждения, °C;  $q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>)

Согласно методике А.П. Кылатчанова [269], температура внутреннего воздуха  $t_{в}$  в момент времени  $\tau$  после отключения системы отопления  $t_{в} = f(\tau)$ , при условии заданных начальных условий  $t_{в} = t_{во}$  и  $t = t_0$ , может быть представлена в виде:

$$t_{в} = t_{н} + \sum_{i=1}^{\infty} B_i M_i e^{-\beta_i^2 \alpha \tau} \quad (5.1)$$

$\tau$  - промежуток времени, час;  $B$  – постоянная величина для каждого  $i$ -го ряда;  $M$  – функция и параметр  $\beta_i$ .

Коэффициент  $M$  находят, решая дифференциальное уравнение с учетом теплового баланса:

$$M_i = f(y, B) \quad (5.2)$$

$\beta_i$  - определяется из характеристического уравнения вида:

$$\beta - \frac{P_1}{\beta} = P_2 \operatorname{ctg}(\beta\delta) \quad (5.3)$$

где,

$$\begin{aligned} P_1 &= \alpha_B \alpha_H / \left( \lambda^2 \left( \frac{\alpha_B}{b} + 1 \right) \right) \\ P_2 &= \left( \alpha_B + \alpha_H + \frac{\alpha_B \alpha_H}{b} \right) / \left( \lambda \left( \frac{\alpha_B}{b} + 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Параметр  $\beta_1$  можно определить численным методом с помощью метода нахождения корней уравнений  $f(x)=0$  (метод касательных [270], в других литературах метод Ньютона [271]). Принцип состоит в построении графиков функции  $y_1$  и  $y_2$ , точка их пересечения соответствует искомому значению  $\beta_1$ .

Пусть  $\beta=x$  и её уравнение нахождения равна  $f(x)=0$ , тогда уравнение приходит к виду:

$$\begin{aligned} x - \frac{P_1}{x} &= \frac{P_2}{\tan(\delta x)} \\ f(x) &= x - \left( \frac{P_1}{x} + \frac{P_2}{\tan(\delta x)} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Основная идея заключается в том, чтобы начинать с начального приближения  $x_0$  и на каждой итерации улучшать это приближение, используя первую производную  $f'(x)$ .

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5.6)$$

Пусть даны две функции  $y_1(x)$  и  $y_2(x)$ , определяемые следующим образом:

$$\begin{aligned} y_1(x) &= x \\ y_2(x) &= \frac{P_1}{x} + \frac{P_2}{\tan(\delta \cdot x)} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Задача состоит в нахождении такого значения  $x$ , при котором  $y_1(x)=y_2(x)$ .

Производная функции  $f(x)$  имеет вид:

$$f'(x) = 1 + \frac{P_1}{x^2} + \frac{b \cdot P_2}{\sin^2(\delta \cdot x)} \quad (5.8)$$

Алгоритм данного метода состоит из следующих шагов:

1. Задание начального приближения  $x_0$ ;
2. Циклическое обновление приближения по формуле  $x_{k+1}$ ;
3. Проверка условия останова  $|f(x_k)| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная точность;
4. Обработка особых случаев, таких как деление на ноль, когда  $f(x)$  близка к нулю.

Темп остывания температуры внутреннего воздуха здания определяется по выражению:

$$m = a \cdot \beta^2 \quad (5.9)$$

Зная значение  $m$ , можно оценить температуру остывшего воздуха за определенный момент времени

$$t_B = t_H + (t_{BO} - t_H) e^{-mt} \quad (5.10)$$

По методике В.Н. Богословского [272]. вводится коэффициент изменения относительной избыточной температуры  $\theta$  (5.11), который определяется в разных сечениях ограждения с расстоянием  $x/l$ , а также во времени, которое определяет коэффициент критерия  $F_0$  (5.12). Относительная избыточная температура  $\theta_{охл}$  находится по формуле (5.13).

$$\theta = \frac{t(x, z) - t(x, 0)}{t(x, \infty) - t(x, 0)} \quad (5.11)$$

$$F_0 = \frac{az}{l^2} \quad (5.12)$$

$$\theta_{охл} = 1 - \theta \quad (5.13)$$

где  $l$ —характерный размер тела;  $a$ —коэффициент теплопроводности;  $z$ —промежуток времени, ч.

В работе [273] подход в расчете коэффициента тепловой аккумуляции  $\beta$ , который представляет с собой отношение суммарной теплоемкости помещения

к сумме коэффициентов теплопотерь помещения инфильтрацией и теплопередачей определяется формулой (5.14):

$$\beta = \frac{C_n}{H_{\frac{m}{n}} + H_{инф}} / 3600 \quad (5.14)$$

где,  $C_n$ —суммарная теплоемкость помещения, Дж/°С;  $H_{m/n}$ —коэффициент тепловых потерь помещения теплоотдачей, Вт/°С;  $H_{инф}$ —коэффициент тепловых потерь помещения инфильтрацией, Вт/°С.

$$\begin{aligned} C_n &= \sum c_i \cdot m_i \\ H_{m/n} &= \sum \frac{F_{oi}}{R_{oi}} \\ H_{инф} &= \frac{c_n \cdot \sum (G_{инфи} F_{oi})}{3600} \end{aligned} \quad (5.15)$$

где,  $C_i$ —удельная теплоемкость  $i$ -го элемента, Дж/°С;  $m_i$ —масса  $i$ -го элемента, кг;  $R_{oi}$ —сопротивление теплопередаче  $i$ -го элемента, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $F_{oi}$ —площадь  $i$ -го фрагмента ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>.

В своей работе [274] по изучению теплового режима массовой застройки, Ю.В. Кононович определяет коэффициент  $\beta$  для многослойной ограждающей конструкции с  $i$ -тым количеством слоев:

$$\beta = \frac{C_{ном}}{3,6 \cdot Q_{уд}} = \frac{\kappa_i \cdot \sum \delta_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot F_i}{3,6 \cdot [\kappa_j \cdot F_j + L \cdot (c_p \cdot \rho)_{вз}]} \quad (5.16)$$

где,  $\kappa_f$ —коэффициент, зависящий от принятого способа обогрева (например, для угловых и средних помещений с радиаторами соответственно равны 0,92 и 0,96).

Для оценки надежности теплоснабжения существует формула Е.Я. Соколова [275], которая позволяет определять температуру внутреннего воздуха после аварийного отключения системы отопления, °С (5.17):

$$t_{вн.в}^k = t_{н.в} + \frac{Q_o}{q_o V} + (t_{вн.в}^h - t_{н.в} - \frac{Q_o}{q_o V}) e^{-\tau/\beta} \quad (5.17)$$

При прерывистой подаче тепловой энергии в здание коэффициент аккумуляции теплоты  $\beta$  принято находить следующим образом (5.18):

$$\beta = \frac{(c\rho F\delta)_{nc}}{2} \cdot \frac{1}{q_o V} \cdot \frac{1}{3600} \quad (5.18)$$

Темп падения температуры внутреннего воздуха в случае аварийного отключения системы отопления будет определяться по формуле (5.19):

$$\Delta t = (t_{вн.в}^H - t_{н.в}) \left[ (1 - e^{-m\tau}) \frac{e^{-\tau/\beta}}{\beta} + (1 - e^{-\tau/\beta}) m e^{-m\tau} \right] \quad (5.19)$$

Количество тепловой энергии, теряемое помещением в течение аварийного отключения системы отопления, составит (5.20):

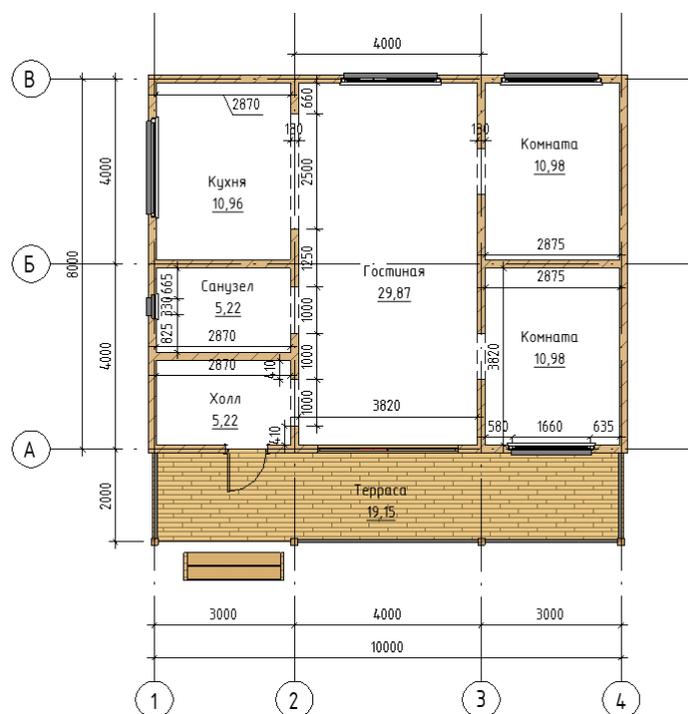
$$\Delta Q_o = Q_o^H \left[ \frac{1 - e^{-m\tau}}{m} + \beta(1 - e^{-\tau/\beta}) - \frac{1}{m + \frac{1}{\beta}} (1 - e^{-(m + \frac{1}{\beta})\tau}) \right] \cdot 3600 \quad (5.20)$$

$$Q_o^H = Q_{огр}^H + Q_{вент}^H (Q_{инф}^H) - Q_{быт}^H$$

где,  $t_{н.в}$ —средняя температура наружного воздуха за период аварийного отключения системы отопления; °С;  $Q_o$ —тепловой поток, поступающий в отапливаемое помещение, Вт;  $q_o$ —удельная тепловая (в некоторых литературных источниках – отопительная) характеристика помещения (или здания в целом), Вт/(м<sup>3</sup>·°С);  $V$ —объем отапливаемого помещения, м<sup>3</sup>;  $t_{вн.в}^H$ —температура внутреннего воздуха в момент аварийного отключения системы отопления, °С;  $\tau$ —период аварийного отключения системы отопления, ч;  $\beta$ —коэффициент аккумуляции теплоты, ч;  $c_{nc}$ ,  $\rho_{nc}$ ,  $F_{nc}$ ,  $\delta_{nc}$ —удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К), плотность, кг/м<sup>3</sup>, площадь поверхности, м<sup>2</sup>, толщина, м, наружной стены помещения;  $Q_{огр}^H$ —суммарные потери теплоты через наружную стену и светопрозрачные конструкции, Вт;  $Q_{инф}^H$ —потери теплоты на инфильтрирующий воздух, Вт;  $Q_{вент}^H$ —тепловые потери с удаляемым вентиляционным воздухом, Вт;  $Q_{быт}^H$ —телопоступление от бытового оборудования, Вт

В качестве примера, для оценки теплоустойчивости ограждающих конструкций из легкого бетона, расчет производился на базе проекта одноэтажного жилого дома, который имеет широкое распространение у

застройщиков частных домов в Республике Саха (Якутия) и уже неоднократно реализован в частном секторе (рисунок 5.2). Общая площадь здания  $S=73,23 \text{ м}^2$ , с площадью остекленности окон  $S_{\text{ок}}=20,77 \text{ м}^2$ , площадью поверхности наружных ограждающих конструкций  $S_{\text{нок}}=91,83 \text{ м}^2$ . Температура воздуха в помещении в момент остановки работы системы теплоснабжения  $t_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$ . Система теплоснабжения—централизованная. Район строительства г. Якутск. Ориентация по сторонам света—условный Север. Климатические характеристики приняты согласно СП 131.13330.2025 «Строительная климатология».



**Рисунок 5.2** – План одноэтажного жилого дома

В работе оценивался легкий бетон на пористом заполнителе с применением композиционного вяжущего (ПЦБ) [276] с показателями, представленными в таблице 5.1. Также были исследованы строительные материалы, представленные в таблице 5.1 в качестве сравнения. При этом материалы были подобраны согласно наиболее распространённым архитектурным и конструктивным решениям ИЖС в условиях Якутии.

В нижеприведенных таблицах и рисунках идентификация исследуемых материалов осуществляется в соответствии с назначенной нумерацией для каждой позиции, указанной в таблице 5.1.

**Таблица 5.1** – Характеристики строительных материалов

Обозначение образца	Материал	Условное обозначение (производитель)	Класс прочности	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Марка по морозостойкости
№1	ПЦБ (пеноцеолитбетон)	Опытный образец	B5,0	900	F100
№2	Сосна	Брус 180x180 сосна 1-3 сорт (АО «Сталепромышленная компания»)	-	500	-
№3	Керамзитобетон	КБС-7ПС30 390-190-300 (ООО «ЖБИ №10»)	M50	800	F75
№4	Ячеистый бетон автоклавного твердения	Блок автоклавного газобетона B3,5 D600 625-300-250 (ООО «Саянскгазобетон»)	B3,5	600	F100
№5	Пенобетон на цементном вяжущем	Стеновые блоки из пенобетона D600 B2 600-300-200 (ООО «ЭКОСТРОЙ ДВ»)	B2	600	F50
№6	Полистиролбетон на портландцементе	Блок полистиролбетонный D450 595-295-375 (АО СЗ Якутпромстрой)	B1,5	450	F200

В расчетах было рассмотрено два варианта наружной ограждающей конструкции согласно наиболее распространённым архитектурным и конструктивным решениям ИЖС:

**Вариант 1:** неутепленный вариант наружных стен, для деревянных домов  $\delta=180$  мм, для зданий из бетонных блоков  $\delta=300$  мм. Сопротивление

теплопередаче ограждающих конструкций не приравнивалось к требуемым условиям для г. Якутск, а рассчитывалось из условий фактических толщин и коэффициентов теплопроводности материалов;

**Вариант 2:** утепленный вариант наружных стен, где толщина наружной ограждающей конструкции оставалась неизменной. В качестве утеплителя принята минеральная вата с плотностью  $\rho=150$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности  $\lambda=0,038$  Вт/(м·°С). Требуемая толщина теплоизоляционного слоя зданий с различными материалами наружных ограждающих конструкции рассчитывалась из уравнения условного сопротивления теплопередаче и определена для всех материалов в значение  $\delta=150$  мм.

Для разработанного ПЦБ в Приложении М СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» отсутствуют расчетные теплотехнические показатели, которые можно было бы использовать при различных расчетах. Далее экспериментально определены и сравнены с показателями Таблицы М.1 СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» значения теплопроводности и удельной теплоемкости используемых материалов, результаты которых представлены в таблице 5.2. При этом, поскольку для ПЦБ отсутствуют расчетные теплотехнические показатели, для обеспечения корректности и единообразия сравнительного анализа в дальнейших расчетах были использованы экспериментальные данные.

**Таблица 5.2** – Экспериментальные полученные теплозащитные свойства строительных материалов

Обозначение образца	Плотность, $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·°С)		Удельная теплоемкость $c_0$ , кДж/(кг·°С)		Толщина стены $\delta_{нс}$ , м
		[24]	Факт	[24]	Факт	
№1	900	-	0,18	-	0,837	0,30
№2	500	0,14	0,12	2,3	2,3	0,18
№3	800	0,29	0,25	0,84	0,797	0,30
№4	600	0,176	0,14	0,84	0,889	0,30
№5	600	0,22	0,20	0,84	0,811	0,30
№6	450	0,13	0,12	1,06	0,9	0,30

Значения теплоемкости и теплопроводности оцениваемых строительных материалов получены экспериментально с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием прибора SENSYS evo TG-DSC by Setaram в отделе тепломассообменных процессов ИФТПС СО РАН.

Теплопроводность определялась методом измерения плотности теплового потока при стационарном режиме по ГОСТ 7076-99 с помощью прибора ИТП-МГ4 «100» в лаборатории строительных материалов СВФУ им. М.К. Аммосова. Характеристика установки: диапазон измерений теплопроводности от 0,02 до 1,5 Вт/м·К, диапазон определения термического сопротивления от 0,01 до 1,5 м<sup>2</sup>·К/Вт, предел основной относительной погрешности определения коэффициента теплопроводности и термического сопротивления  $\pm 5\%$ .

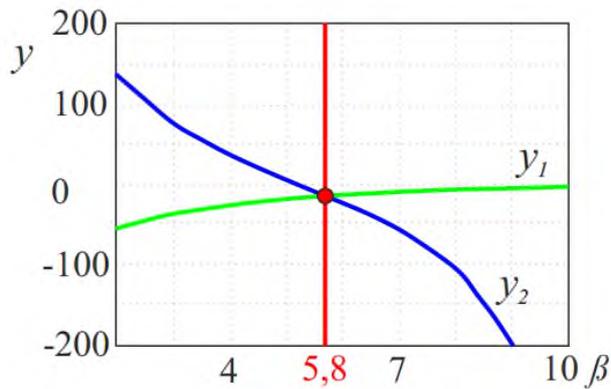
Экспериментальные полученные теплозащитные свойства материалов приняты для оценки влияния стенового материала на тепловую надежность ограждающей конструкции в случае возникновения аварий на источнике теплоснабжения.

По результатам расчетов, приведенные в таблице 5.3, отличие в значениях коэффициента аккумуляции теплоты  $\beta$  между рассматриваемыми методиками обусловлена различными факторами, влияющие на колебания температуры внутреннего воздуха, а также способами ее определения. Значения коэффициентов  $\beta$  по методике А.П. Кылатчанова определялись графическим способом (рисунок 5.3) по принципу построения графиков функций  $y_1 = \beta - P_1 / \beta$  и  $y_2 = P_2 \text{ctg}(\beta\delta)$ , где значения  $P_1$  и  $P_2$  находятся по формуле (5.3). Коэффициент  $\beta$ , в расчетах по методике расчета В.Н. Богословского принимается по данным, полученных в ходе расчета по методике А.П. Кылатчанова.

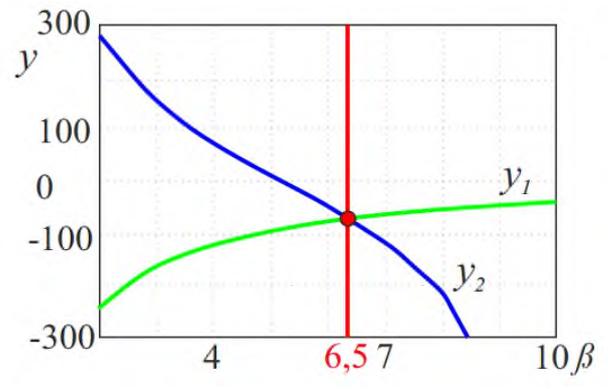
**Таблица 5.3** – Коэффициенты темпа остывания и аккумуляции теплоты

Обозначение образца	Темп остывания $t$	Коэффициент $\beta$ , ч, полученный по методикам:		
		<i>Кылатчанов</i>	<i>Кононович</i>	<i>Соколов</i>
№1	30,76	5,98	42,7	30,34
№2	36,82	9,9	36,85	27,79
№3	47,48	5,8	29,27	25,68

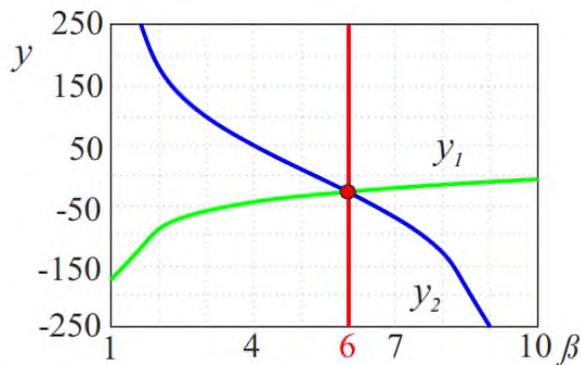
Обозначение образца	Темп остывания $t$	Коэффициент $\beta$ , ч, полученный по методикам:		
		Кылатчанов	Кононович	Соколов
№4	35,16	6,1	38,39	21,48
№5	53,27	6	28,01	19,6
№6	45,07	6,5	34,4	16,31



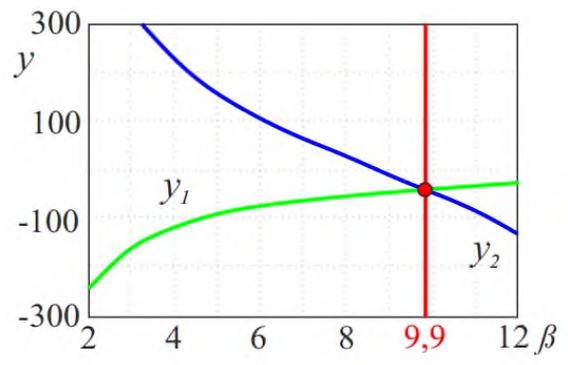
а)



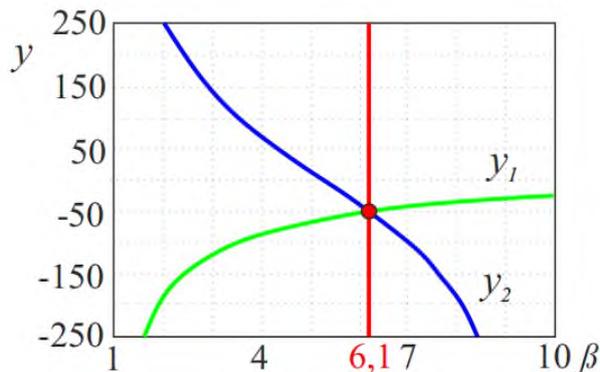
б)



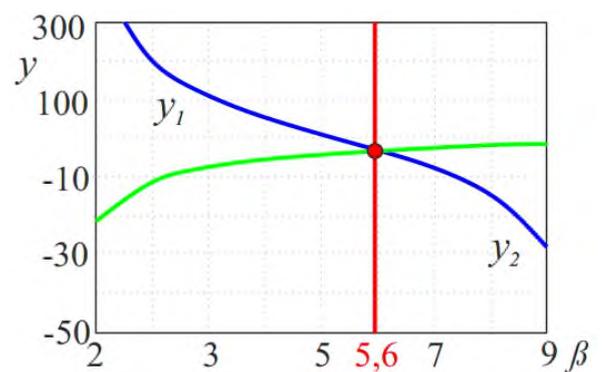
в)



г)



д)



е)

**Рисунок 5.3** – Графический способ определения коэффициента по  $\beta$  методом А.П. Кылатчанова

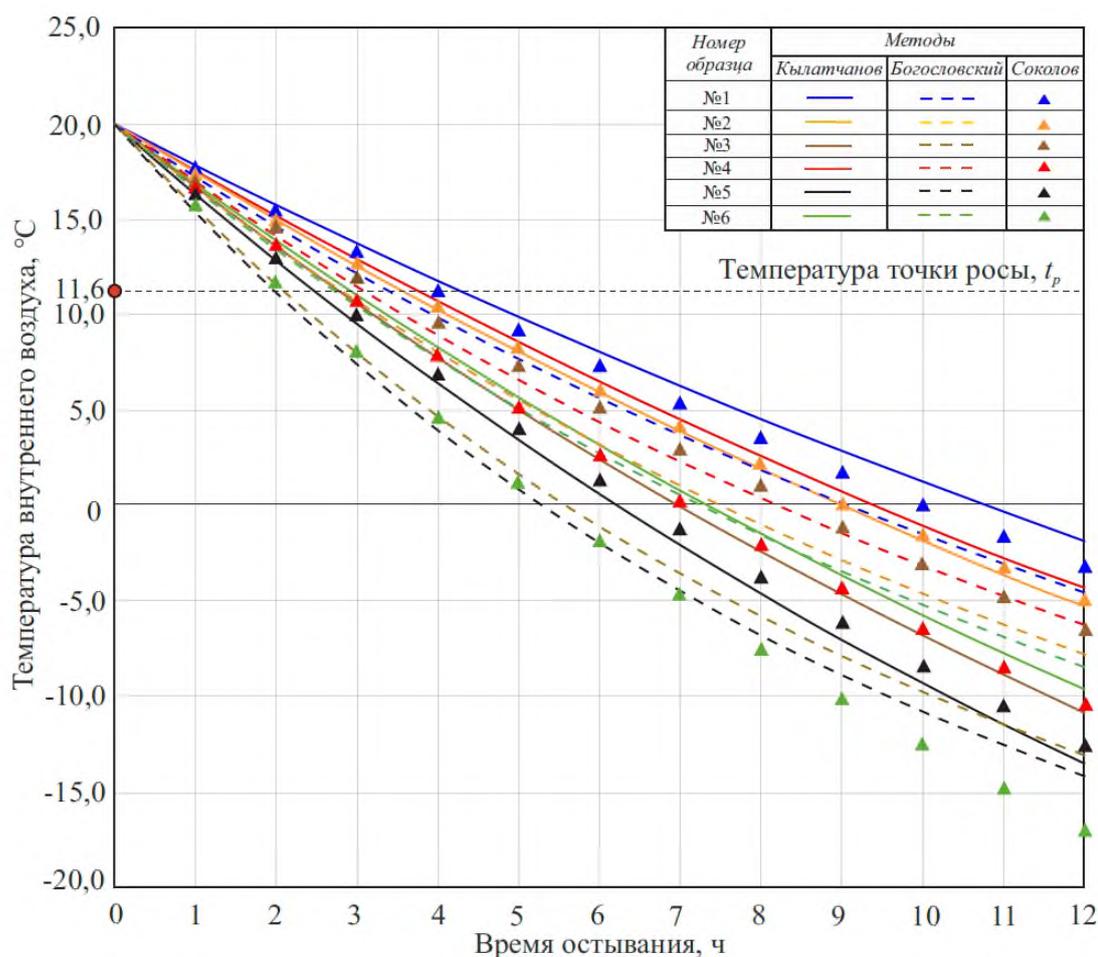
а) – керамзитобетон на кварцевом песке; б) – полистиролбетон на портландцементе; в) – пенобетон на цементном вяжущем; г) – сосна; д) – ячеистый бетон автоклавного твердения; е) – ПЦБ

Полученные результаты выявили значительный разброс значений коэффициента  $\beta$ , полученных различными расчетными методами, однако определяемый темп остывания  $m$  однозначно свидетельствует о существенной дифференциации теплоаккумулирующих свойств исследуемых материалов. Значение темпа остывания для ПЦБ (№1), равное  $m=30,76$ , демонстрирует наивысшую теплоаккумулирующую способность, превосходя ячеистый бетон автоклавного твердения (№4) на 12%, полистиролбетон (№6) на 46%, а керамзитобетон (№3) на 47%, одновременно опережая сосну (№2) на 5%. Пенобетон (№5) и керамзитобетон (№3) характеризуются значительно менее выраженными свойствами теплоаккумуляции.

В статье [277] говорится, что чем больше значение темпа остывания  $m$ , тем быстрее происходит процесс остывания. Расчет темпа охлаждения остывания здания проводился в зависимости от температуры внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции в продолжительности от 0 до 12 часов. Результаты расчета для конструктивного решения по Варианту 1 сведены в рисунок 5.4. Температура точки росы  $t_p$  при температуре внутреннего воздуха  $t_g=20^\circ\text{C}$  и относительной влажности внутреннего воздуха  $\varphi=55\%$ , принятой для помещений жилых зданий по СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий», составляет  $+11,6^\circ\text{C}$ . Данное значение является определяющим в поиске продолжительности остывания ограждающих конструкций для рассматриваемой задачи.

Из рисунка 5.4 видно, что результаты полученные методом А.П. Кылатчанова, демонстрируют согласованность с методами В.Н. Богословского и Е.Я. Соколова при незначительных отклонениях в значениях, при этом метод А.П. Кылатчанова фиксирует наибольшие температурные показатели, метод Е.Я. Соколова наименьшие. Анализ времени остывания до  $0^\circ\text{C}$  выявил преимущество ПЦБ (№1) – *11 часов* по методике А.П. Кылатчанова, *10 часов* по методике В.Н. Богословского и *9 часов* по методике Е.Я. Соколова, что существенно превышает показатели пенобетона (№5), который остывает за 6 часов по методике А.П. Кылатчанова и В.Н. Богословского, за 5 часов по Е.Я.

Соколову. Сосна (№2), подтвердившая хорошие теплоаккумулирующие свойства, демонстрирует промежуточные значения, 9 часов по методике А.П. Кылатчанова и В.Н. Богословского, 7,5 часов по Е.Я. Соколову, что подчеркивает ее эффективность по сравнению с традиционными бетонными материалами.

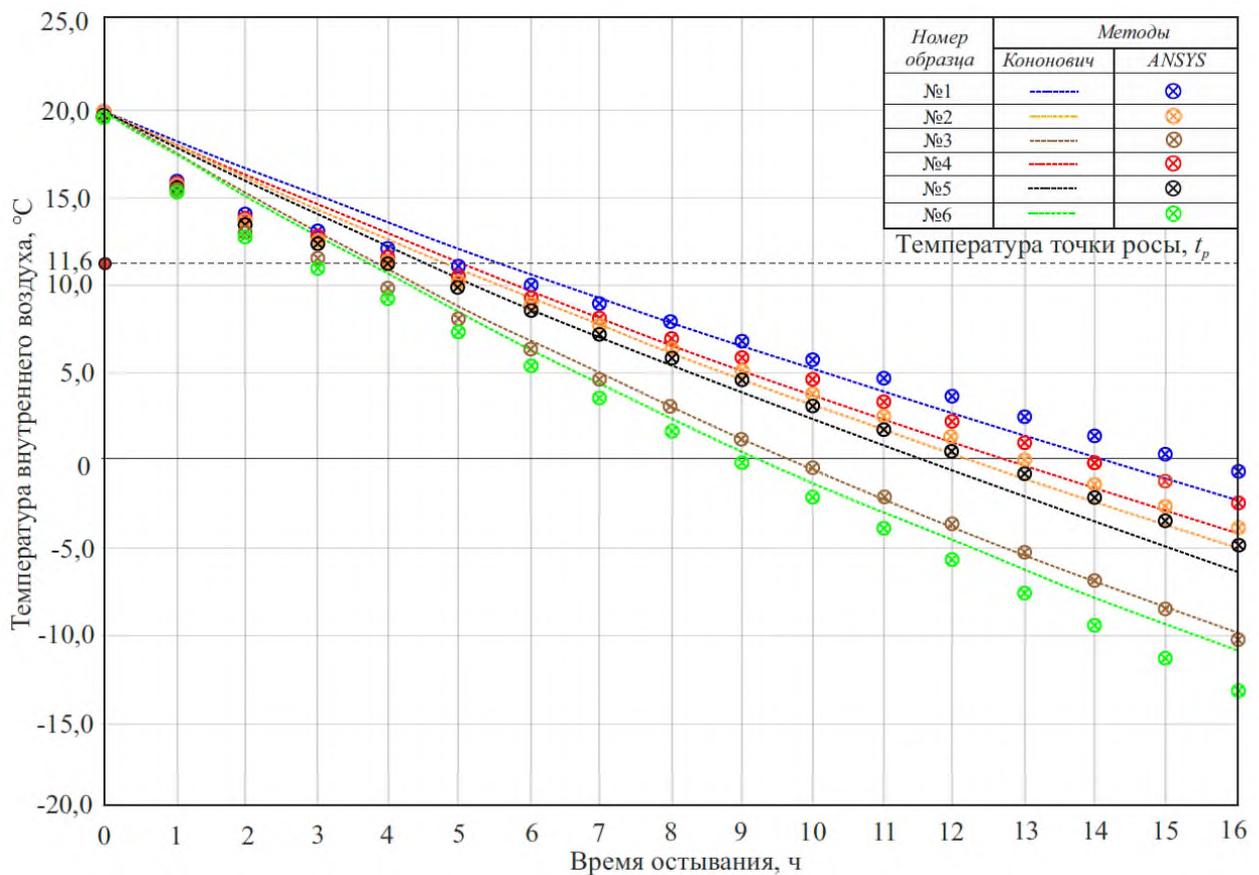


**Рисунок 5.4** – График остывания здания при различных материалах наружной стены в зависимости от времени без утепления

На основании расчетов, выполненных методом Ю.В. Кононовича, представлены результаты (рисунок 5.5) определения времени остывания здания в зависимости от типа материала стеновой конструкции с наружным утеплением (Вариант 2). Данный расчет выполнен с целью оценки поведения стеновой конструкции с наружным утеплением фасадной части, толщина которого была определена исходя из требуемого условия сопротивления

теплопередачи рассматриваемого фрагмента конструкции для г. Якутск в соответствии с СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий», в случае возникновения аварийной остановки теплоснабжения.

Для сравнения был смоделирован процесс зависимости остывания температуры внутреннего воздуха от теплоемкости наружной ограждающей конструкции в программном комплексе ANSYS. Построение расчетной области в программном комплексе происходила тетраэдным методом автоматического создания сетки с типом теплового анализа «Transient Thermal».



**Рисунок 5.5** – График остывания здания при различных материалах наружной стены в зависимости от времени с утеплением

Для всех рассматриваемых материалов стеновой конструкции применение тепловой изоляции приводит к значительному увеличению времени остывания здания (рисунок 5.5), что является предельно логичным. Результаты, выполненные методом Ю.В. Кононовича, демонстрируют

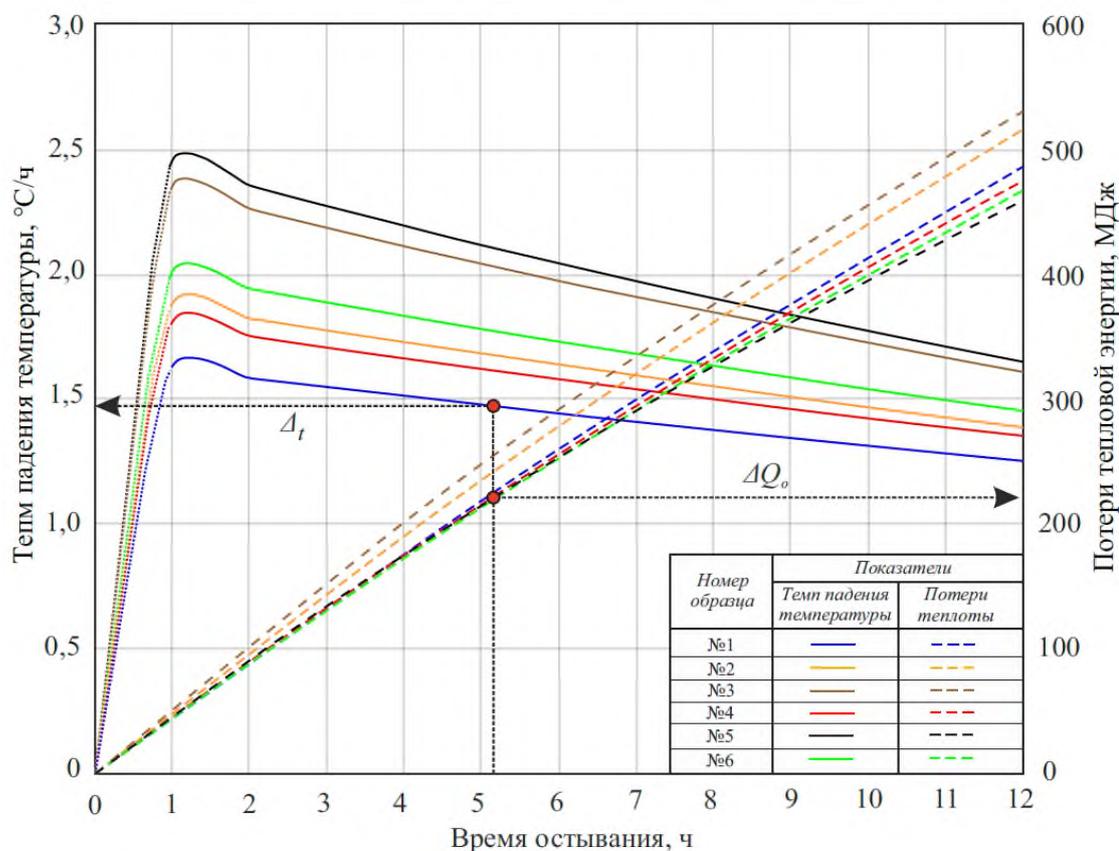
хорошую сходимость с данными численного моделирования в ANSYS, что подтверждает достоверность примененной методики. Наибольшее время сохранения положительной температуры в помещении в случае остановки теплоснабжения показала конструкция из разработанного ПЦБ (№1).

На рисунке 5.6 представлены графики изменения темпа падения температуры  $\Delta_t$  и потерь тепловой энергии  $\Delta Q_o$  за период остывания здания, которые были построены на основе результатов расчетов, выполненных по методике, приведенной в [277].

На рисунке 5.6 стоит обратить внимание, на тот факт, что темп падения температуры в начальный период времени характеризуется неопределенными процессами: с момента выхода из начала координат, мгновенно достигается максимальное значение, после чего наступает период постепенного затухания темпа падения температуры. Период времени остывания от 0 до 1 часа изображен не сплошной, а пунктирной линией. Максимальное значение темпа падения температур наружного ограждения на основе рассматриваемых материалов достигается в момент времени  $\tau=1$  час. В случае наружной ограждающей конструкции из ПЦБ (№1) в момент достижения времени остывания  $t_p=5,1$  часов до достижения температуры точки росы, согласно рисунку 5.6, темп падения температуры составил  $\Delta_t=1,479^\circ\text{C}/\text{ч}$ , потери тепловой энергии  $\Delta Q_o=219,3$  МДж. Для сравнения, при  $t_p=5,1$  часа для наружной ограждающей конструкции из керамзитобетона (№3), потери тепловой энергии составят  $\Delta Q_o=245,65$  МДж. По полученным результатам расчета, составлены таблицы, где представлены время остывания до температуры точки росы  $t_p$  (таблица 5.4) и время остывания температуры внутреннего воздуха до  $t_g=0^\circ\text{C}$  (таблица 5.5)

На основе результатов, представленных в таблице 5.4, наблюдаются расхождения в получении конечной величины температуры точки росы, определяемая различными методиками. Однако стоит отметить тот факт, что результаты расчетов, полученные разными методиками, имеют строгое ранжирование по времени остывания до температуры точки росы  $t_p$ , что дает косвенное суждение об рациональности стеновой конструкции из ПЦБ с точки

зрения тепловой эффективности в период остановки теплоснабжения по сравнению с другими материалами.



**Рисунок 5.6** – Темп падения температуры и потери тепловой энергии в здании при различных материалах наружной стены

**Таблица 5.4** – Время остывания до температуры точки росы  $t_p$

Обозначение образца	Время остывания до температуры точки росы $t_p$ , ч				
	Неутепленная стена			Утепленная стена	
	<i>Кылатчанов</i>	<i>Богословский</i>	<i>Соколов</i>	<i>Кононович</i>	<i>ANSYS</i>
№1	5,1	4,3	4,8	5,3	4,5
№2	4,4	3,7	4,5	4,5	4,1
№3	3,7	3	4,2	3,6	3
№4	4,6	3,95	3,7	4,7	4
№5	3,4	2,8	3,5	3,5	2,8
№6	3,8	3,5	3	4,2	3,8

Согласно полученным данным по таблице 5.5, разработанный ПЦБ (№1) также демонстрирует лучшую способность аккумуляции тепла при условии утепления, где остывание происходит при 14,1 часов, та же сосна (№2) с

ячеистым бетоном (№4) показывает остывание за *12,1-12,8 часов*. Наиболее существенный абсолютный прирост времени остывания зафиксированы у остальных материалов, однако пенобетон (№5), который при использовании утепления, увеличил показатель до *9,2 часов*, что на 3 часа превышает его исходные характеристики (рисунок 5.5). Согласно [278] предельное время допустимой продолжительности перерыва отопления, которое можно квалифицировать как аварийный случай, составляет не более 16 часов одновременно при температуре внутреннего воздуха в жилых помещениях от +12°C до нормативной температуры +20°C. Однако согласно таблице 5.5 даже наружные ограждающие конструкции, которые по тепловой защите в полной мере соответствуют действующим нормативам для рассматриваемого района строительства не способны по показателям тепловой эффективности выдержать самую длительную продолжительность устранения аварии на системе теплоснабжения.

**Таблица 5.5** – Время остывания температуры внутреннего воздуха до  $t_g=0^\circ\text{C}$

Обозначение образца	Время остывания до температуры 0°C $\tau_0$ , ч				
	Неутепленная стена			Утепленная стена	
	<i>Кылатчанов</i>	<i>Богословский</i>	<i>Соколов</i>	<i>Кононович</i>	<i>ANSYS</i>
№1	11,8	10,1	11	14,1	15,3
№2	10	8,5	10,1	12,1	13,0
№3	8	6,7	9,5	9,8	9,9
№4	10,5	9,1	8,1	12,8	14,0
№5	7,2	6,2	7,5	9,2	9,0
№6	8,3	8,2	6,4	11,4	12,4

Исходя из концепции безопасности, соблюдения комфортности и обеспечения жизнедеятельности, что особо актуально в климатических условиях с продолжительным отопительным периодом, выполненный расчет может быть использован для оценки времени и ресурсов, необходимых для ликвидации аварий на источниках теплоснабжения. Тепловая аккумуляция материалов ограждающих конструкций играет первостепенную роль в

сохранении требуемого теплового режима помещения в случае аварийного отключения системы отопления.

Таким образом, проведенная оценка теплоустойчивости, основанная на сравнительном анализе существующих методик расчета и численного моделирования в ANSYS, позволила расчетно обосновать высокую тепловую эффективность наружных ограждающих конструкций из ПЦБ, по сравнению с не менее распространенными строительными материалами в регионе, в случае аварийной остановки системы теплоснабжения. Установлено, что ограждающая конструкция из ПЦБ обеспечивает максимальное время сохранения допустимой температуры в помещении до начала образования конденсации влаги со стороны внутренних стен за счет повышенной теплоаккумулирующей способности, что подтверждает ее потенциал для повышения надежности зданий.

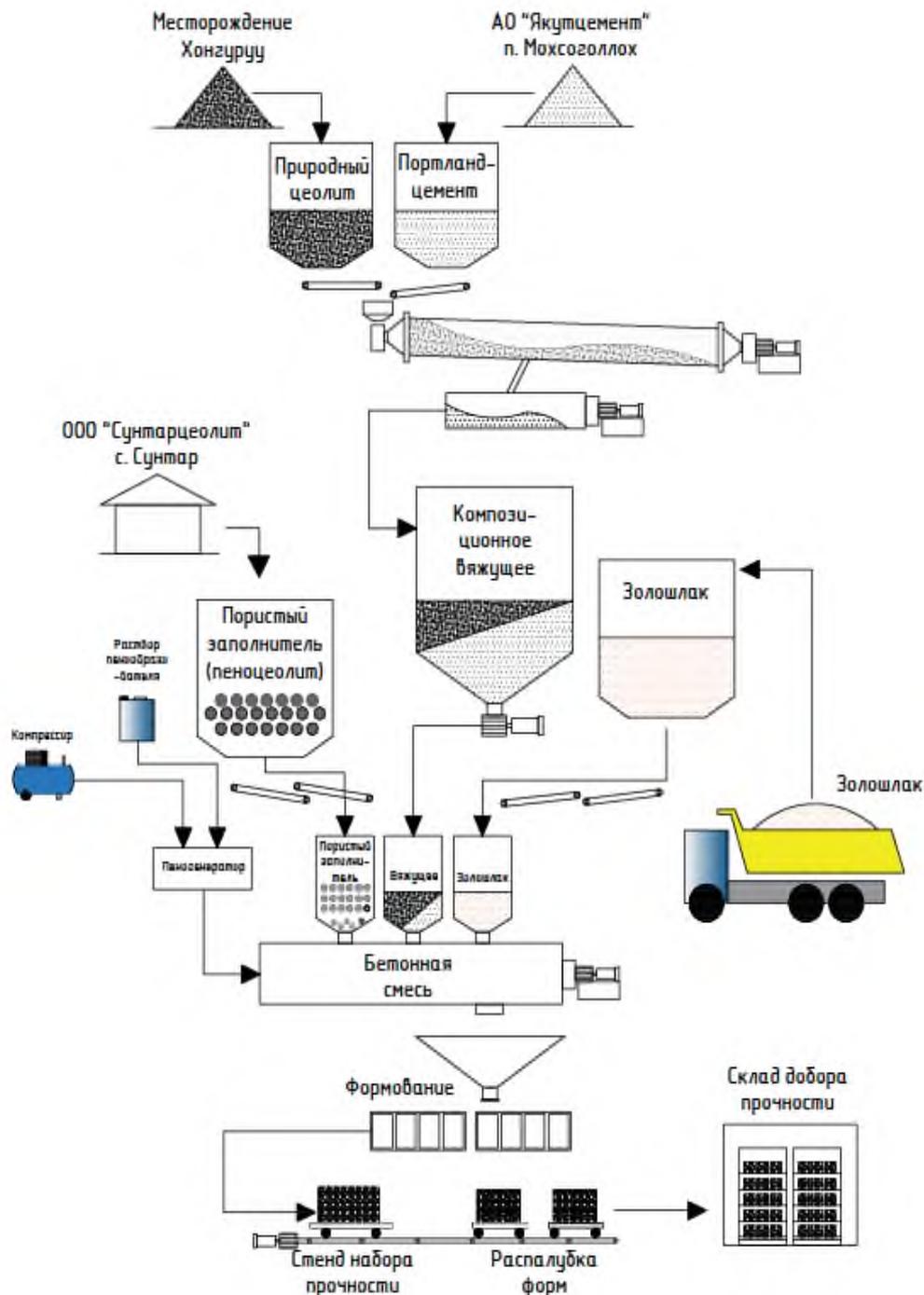
## **5.2. Разработка технологии производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита и пористого заполнителя**

Проектирование технологической линии производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита производилось с учетом существующих производственных мощностей по выпуску пористых заполнителей ООО «Сунтарцеолит» (с. Сунтар). Основными технологическими пределами при получении легкого бетона на композиционном вяжущем являются:

- Производство композиционного вяжущего с применением природного цеолита;
- Приготовление бетонной смеси;
- Приготовление пены;
- Заливка бетонной смеси в формы;
- Выдержка форм;
- Распалубка форм;

- Отправка на стенд для добора прочности;
- Упаковка и складирование изделий;

Технология получения легкого бетона предусматривает применение композиционного вяжущего с удельной поверхностью 520–550 м<sup>2</sup>/кг (рисунок 5.7).



**Рисунок 5.7** – Принципиальная схема линии по производству легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита

Для тонкого измельчения сырьевых компонентов наиболее подходящим вариантом для нашей технологической линии производства является применение шаровых мельниц по сухому способу помола (рисунок 5.8) с разгрузочной решеткой и комбинированным питанием для дозировки добавляемых компонентов.

Исходные материалы в расходные бункеры на территории линии производства загружаются при помощи фронтальных одноковшовых погрузчиков на колесной базе.

В шаровую мельницу природный цеолит поступает из расходного бункера по ленточному транспортеру, а портландцемент посредством пневмотранспорта с пылеулавливающим рукавом за счет работы ротационного компрессора. После тонкого измельчения исходных материалов, мельница должна обеспечивать выход готового композиционного вяжущего со значением удельной поверхности 520–550 м<sup>2</sup>/кг. Готовое вяжущее поступает в силос хранения мелкодисперсных материалов (рисунок 5.9).



**Рисунок 5.8** – Мельница сухого помола композиционного вяжущего



**Рисунок 5.9** – Силосы для хранения мелкодисперсных материалов

Золошлак и пористый наполнитель подаются по ленточному транспортеру к дозаторам сухих компонентов от бункеров хранения (рисунок 5.10). Композиционное вяжущее подается пневматическими транспортерами в дозатор сухих компонентов. Вода подается непосредственно в смеситель через расходомер. Весовые дозаторы объединяются системой управления, обеспечивающей их разгрузку в смеситель оператором (рисунок 5.11).



**Рисунок 5.10** – Дозатор сухих компонентов



**Рисунок 5.11** – Бетоносмесительная установка принудительного действия

Первичной операцией является дозирование исходных компонентов по заданному составу. Далее приготавливается пенная масса с использованием специального пеногенератора (рисунок 5.12). Рабочий раствор пенообразователя аэрируется воздухом, подаваемым компрессором (рисунок 5.13) при рабочем давлении 0,25 – 0,3 МПа. Сформированная пена подается в смеситель через специальный вводной патрубок.

Последовательность смешения: в бетоносмесительной установке композиционное вяжущее смешивают с золошлаком, далее затворяется водой, добавление пористого наполнителя – пеноцеолита. После в образовавшуюся смесь подается готовая механически устойчивая пена. Полученная смесь должна составлять порядка 900 г/л для получения бетонных блоков плотностью

D900. Количество и объемы смесителя подбираются согласно необходимой производительности технологической линии.



**Рисунок 5.12** – Пеногенератор



**Рисунок 5.13** – Компрессор

Бетонные блоки вынимаются из раскрытой формы (рисунок 5.14). Далее блоки на поддоне штангами захвата устанавливаются на вагонетку для дальнейшего перемещения на стенд добора прочности, где происходит добор прочности в 70%, после чего отправляются на склад готовой продукции.



**Рисунок 5.14** – Форма для бетонной смеси 600x300x200

Таким образом, предложена технологическая схема по производству легкобетонных изделий с применением цеолитсодержащего композиционного вяжущего, учитывающая технологические пределы получения композиционного вяжущего ТМЦ–85 методом сухого помола, его использования взамен портландцемента и использования золошлаковых отходов. Предложенная технология адаптирует современные технические приемы к региональным особенностям, учитывая специфику сырьевой базы региона и обеспечивая практическую реализуемость.

### **5.3. Технико-экономическая эффективность производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита**

В данной главе рассматривается применение композиционного вяжущего в качестве альтернативного решения для снижения расхода цемента для производства легкого бетона на базе ООО «Сунтарцеолит», находящегося в с. Сунтар, учитывая непосредственную близость добычи природного цеолита месторождения Хонгуруу.

Общие капитальные затраты на организацию производства, включающие приобретение и доставку 22 единиц необходимого оборудования составляют 4143 тыс. руб (таблица 5.6).

По данным АО «Якутцемент» на 01 сентября 2025 года стоимость одной тонны цемента составляет **13 518 рублей**. Согласно выполненным расчетам затраты на производство 1 тонны композиционного вяжущего ТМЦ–85 будут составлять 15 190,3 рублей с учетом затрат на доставку портландцемента с п. Мохсоголлох до с. Сунтар, расстояние между которыми составляет 1046,6 км по Федеральной автомобильной дороге А331 «Виллой». Из таблицы 5.7 видно, что материально затратным сырьем для производства композиционного вяжущего является цемент.

Для подтверждения эффективности производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита на пористом заполнителе производства ООО «Сунтарцеолит», произведем расчет затрат

сырьевых материалов для изготовления 1 м<sup>3</sup> легкого бетона с плотностью D900 в зависимости от применяемого вяжущего.

**Таблица 5.6** – Капитальные затраты на организацию производства

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц, шт.	Стоимость оборудования, тыс. руб.		Затраты на доставку тыс. руб.	Общая стоимость тыс. Руб.
			За единицу	Общая		
1	Погрузчик фронтальный одноковшовый Lugong-China Mini Loaders	1	1620	1620	250	1870
2	Силос для хранения мелкодисперсных материалов	1	375	375	120	495
3	Бункер для клинкера, природного цеолита и золошлака	3	65	195	50	245
4	Пеногенератор	1	55	55	20	75
5	Компрессор	1	12	12	15	27
6	Весовой дозатор	3	90	270	20	290
7	Бетоносмеситель	1	70	70	30	100
8	Формы металлические для 14 блоков (600х300х200)	5	42	210	100	310
9	Шнековый питатель	1	60	60	30	90
10	Ленточный транспортер скребковый	4	74	296	50	346
11	Шаровая (планетарная) мельница сухого помола	1	200	200	95	295
<b>ИТОГО</b>						<b>4143</b>

**Таблица 5.7** – Материальные затраты на производство 1 тонны композиционного вяжущего ГМЦ–85

Компоненты	Норма расхода, единица	Стоимость за единицу сырья, руб	Затраты на доставку, тыс. руб.	Общая стоимость, руб.
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	0,85 т	13518	4	14890,3
Природный цеолит	0,15 т	2000	-	300
<b>ИТОГО</b>				<b>15190,3</b>

Себестоимость 1 м<sup>3</sup> блоков плотностью D900 кг/м<sup>3</sup> на чистом портландцементе составила 17076,5 рублей (таблица 5.8). Себестоимость 1 м<sup>3</sup> блоков плотностью D900 кг/м<sup>3</sup> на композиционном вяжущем составила 14232,5 рублей (таблица 5.9).

**Таблица 5.8** – Материальные затраты на производство легкого бетона D900 на основе портландцемента

Наименование сырья	Единица измерения	Норма расхода на 1 м <sup>3</sup> , единица	Стоимость руб./единица	Стоимость на 1 м <sup>3</sup> , руб.
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (+доставка)	кг	450	17,51	9679,5
Пористый заполнитель (пеноцеолит)	кг	265	24	6360,0
Пенообразователь Rosrepa (+доставка)	л	83	11	913,0
Золошлак(+доставка)	кг	30	3,5	105,0
Вода	м <sup>3</sup>	225	84,53	19,0
<b>ИТОГО</b>				<b>17076,5</b>

**Таблица 5.9** – Материальные затраты на производство легкого бетона D900 на основе композиционного вяжущего ТМЦ–85

Наименование сырья	Единица измерения	Норма расхода на 1 м <sup>3</sup> , кг	Стоимость руб./единица	Стоимость на 1 м <sup>3</sup> , руб.
ТМЦ–85 (с учетом доставленного портландцемента)	кг	450	15,19	6835,5
Пористый заполнитель (пеноцеолит)	кг	265	24	6360,0
Пенообразователь Rosrepa (+доставка)	л	83	11	913,0
Золошлак(+доставка)	кг	30	3,5	105,0
Вода	м <sup>3</sup>	225	84,53	19,0
<b>ИТОГО</b>				<b>14232,5</b>

Расчет материальных затрат выявил, что относительная величина экономии на материальных затратах на производства 1 м<sup>3</sup> легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита и пеноцеолита будет составлять:

$$\mathcal{E}_{\text{отн.м}^3} = \frac{17076,5 - 14232,5}{17076,5} \cdot 100\% = 16\%$$

На основании расчетов установлено, что разработанные составы на композиционном вяжущем с применением природного цеолита для производства легкого бетона на пористом заполнителе более экономичны по сравнению с классическими составами на портландцементе.

#### 5.4. Внедрение результатов работы

Данная диссертационная работы была выполнена в рамках гранта программы «УМНИК-2021» Фонда содействия инновациям (Договор №17895ГУ/2022 от 20.05.2022 г.), государственных контрактов № 8319, 7633 с Академией наук РС(Я) и программы деятельности НОЦ «Север» по направлению «Технологии хозяйственной деятельности в криолитозоне и новые материалы».

Для внедрения результатов проведенного исследования разработаны следующие нормативные документы:

- стандарт организации СТО 02069705-83001-2025 «Легкий бетон на композиционном вяжущем с применением природного цеолита» (Приложение А);
- технологический регламент на производство стеновых блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита (Приложение Б).

Аппробация технологии получения конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов на пористом заполнителе с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в промышленных условиях осуществлялась на

производственной линии предприятия ООО «Сунтарцеолит» Республики Саха (Якутия) (Приложение В).

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используется в учебном процессе ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство, профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций»; магистров по направлению 08.04.01 Строительство, профиль «Строительные материалы и технологии в условиях криолитозоны», что отражено в рабочих программах дисциплин «Вязущие вещества», «Технология бетона, строительных изделий и конструкций» и «Проблемы строительного материаловедения» (Приложение Г).

### **5.5. Выводы по главе 5**

1. Расчетно обоснована высокая тепловая эффективность наружных ограждающих конструкций из ПЩБ, по сравнению с не менее распространенными строительными материалами в регионе, в случае аварийной остановки системы теплоснабжения. Установлено, что ограждающая конструкция из ПЩБ обеспечивает максимальное время сохранения допустимой температуры в помещении до начала образования конденсации влаги со стороны внутренних стен за счет повышенной теплоаккумулирующей способности, что подтверждает ее потенциал для повышения надежности зданий.

2. Предложена технологическая схема по производству легкогобетонных изделий с применением цеолитсодержащего композиционного вяжущего, учитывающая технологические пределы получения композиционного вяжущего ТМЦ–85 методом сухого помола, его использования взамен портландцемента и использования золошлаковых отходов. Предложенная технология адаптирует современные технические приемы к региональным особенностям, учитывая специфику сырьевой базы региона и обеспечивая практическую реализуемость.

3. Доказана технико-экономическая эффективность производства легкого бетона на композиционном вяжущем с применением природного цеолита на пеноцеолите и его преимущество перед легким бетоном на цементном вяжущем. Материальные затраты на его производство снижаются на 16% за счет снижения расхода портландцемента, что в долгосрочной перспективе позволит отслеживать ежегодный рост экономической эффективности предприятия.

4. Для внедрения результатов проведенного исследования разработаны нормативные документы: стандарт организации СТО 02069705-83001-2025 «Легкий бетон на композиционном вяжущем с применением природного цеолита»; технологический регламент на производство стеновых блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита.

5. Аппробация технологии получения конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов на пористом заполнителе с применением природного цеолита месторождения Хонгуруу в промышленных условиях осуществлялась на производственной линии предприятия ООО «Сунтарцеолит» Республики Саха (Якутия). Выпущенная партия использована для возведения подсобных помещений на территории предприятия в с.Устье.

6. Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используется в учебном процессе ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство, профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций»; магистров по направлению 08.04.01 Строительство, профиль «Строительные материалы и технологии в условиях криолитозоны», что отражено в рабочих программах дисциплин «Вяжущие вещества», «Технология бетона, строительных изделий и конструкций» и «Проблемы строительного материаловедения».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе с использованием природного цеолита и комплекса добавок – пенообразователя и золошлаковых отходов для обеспечения рациональной плотности растворной части пеноцеолитбетона. Установлены закономерности влияния состава бетонной смеси легкого бетона на физико-механические свойства.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее повышение эффективности технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе – пеноцеолите, заключающееся в: замене цемента композиционным вяжущим с использованием природного цеолита (ТМЦ–85); поризации цементной матрицы введением пенообразователя; снижении плотности бетона за счет использования в качестве микрозаполнителя золошлакового отхода. Формирование рациональной плотности растворной части легкого бетона в сочетании с КВ обеспечивают повышение пористости и снижение теплопроводности при повышении прочности и марки морозостойкости пеноцеолитбетона.

Установлен характер влияния цеолита как активного компонента КВ на процессы гидратации и свойства цементного камня с его использованием. За счет пуццолановой активности цеолита в составе КВ: возрастает длительность процессов гидратации и фазообразования, способствующих повышению содержания идиоморфных кристаллов новообразованных гидросиликатов различной основности и уплотнению микроструктуры цементного камня; сохраняется значение коэффициента торможения при твердении композиционного вяжущего на уровне значения соответствующего исходному портландцементу; повышается прочность цементного камня на 8,5 % при сокращении клинкерной составляющей на 15 %. Факторами качества природного цеолита, определяющими эффективность его использования как кремнеземного компонента КВ, высокую активность по отношению к СаО и

коэффициент качества ( $K_K=1,16$ ), являются: полиминеральный состав; высокая пористость; высокая размолоспособность и полифракционный состав получаемого порошка; способность обеспечивать длительную гидратацию цементного камня даже после циклов замораживания и оттаивания.

Предложен механизм формирования рациональной структуры легкого бетона, обеспечивающей снижение теплопроводности при повышении прочности, при совместном использовании ТМЦ–85, пеноцеолита и комплекса добавок для обеспечения рациональной плотности растворной части – пенообразователя и золошлакового отхода. За счет разного уровня дисперсности пор, обеспечиваемого высокой концентрацией пеноцеолита, поризацией цементной матрицы пенообразователем и наличием золошлакового, создается объемная плотноупакованная пористая структура бетона. Развитая морфология поверхности пуццоланово-активных заполнителей (пеноцеолита и ЗШО) служит подложкой для кристаллизации продуктов гидратации. Рациональная плотность растворной части в совокупности с прочной контактной зоной цементного камня с заполнителями, способствуют повышению прочности пеноцеолитбетона.

Установлен рациональный уровень концентрации пористого заполнителя ( $\varphi = 0.59$ ) в составе бетонной смеси для достижения максимальной прочности легкого бетона ( $R_{сж} = 6,5$  МПа) при заданной плотности (D900).

Разработаны составы и технология получения конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона – пеноцеолитбетона, на основе пористого заполнителя, КВ ТМЦ–85, золошлакового наполнителя с использованием пенообразователя Rospena, позволяющие получить изделия с маркой по плотности D900, классом по прочности до B5,0 и маркой по морозостойкости F100.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству легких бетонов на пористых заполнителях в регионах Крайнего Севера и Арктики, а также в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении: снижения плотности легкого бетона на пористых заполнителях с КВ в целях расширения номенклатуры изделий; расширения спектра используемых местных сырьевых материалов для получения КВ; анализа снижения температуры внутреннего воздуха в жилых помещениях зданий, возводимых на основе стенового материала из легкого бетона, до уровня критической при аварии системы теплоснабжения в условиях низких температур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белоусов, П.Е.* Минерально-сырьевая база цеолитов России / П. Е. Белоусов, П. Э. Кайлачаков, А. О. Румянцева // Георесурсы. - 2024. - №26 (4). - С. 260-274. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.12>
2. *Местников, А. Е.* Возможности производства гранулированного пеностеклянного материала в условиях Якутии / А. Е. Местников, Д. Г. Павлов // Современные тенденции развития науки и технологий. - 2016. - №1 (8). - С. 32-35.
3. *Хахилева, Д. Ю.* Анализ конструкций из легкого бетона для возведения малоэтажных жилых домов / Д. Ю. Хахилева, А. А. Тагилова, О. А. Шутова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2022. – Т. 1. – С. 321-326.
4. *Дмитриенко, Е.А.* Инновационное конструирование зданий малой этажности из сборных железобетонных элементов с применением высококачественного легкого бетона / Е. А. Дмитриенко, А. С. Волков, В. Д. Швецов [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – № 3(161). – С. 34-41.
5. *Баишев, Н. К.* Энергоэффективность зданий с использованием ограждающих конструкций с использованием пеноцеолита / Н.К. Баишев // АММОСОВ-2021. - Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (Якутск), 2021. - С. 835-837.
6. *Стешенко, А.Б.* Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон для индивидуального монолитного жилищного строительства / А. Б. Стешенко, А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 320-328. – DOI 10.15828/2075-8545-2024-16-4-320-328.
7. *Steshenko, A. B. et al.* Structural and heat insulating cement based concrete with complex glyoxal based additive / A. B. Steshenko, A. S. Simakova, A. S. Inozemtcev, S. S. Inozemtcev // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2022. – Vol. 14, No. 5. – P. 353-362. – DOI 10.15828/2075-8545-2022-14-5-353-362.

8. *Пастушков, П. П.* Оценка энергоэффективности ячеистых бетонов автоклавного твердения для различных климатических зон России / П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, С. И. Гутников // Интернаука. – 2024. – № 46-1(363). – С. 22-24.
9. *Иноземцев, А. С.* Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2024. – № 7. – С. 41-47. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47.
10. *Иннокентьева, Л. С.* Легкие бетоны на основе органических заполнителей для малоэтажного строительства / Л. С. Иннокентьева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2017 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 1564-1568.
11. *Егорова, А. Д.* Производство строительных материалов из местного минерального сырья для арктических районов Северо-Востока России / А. Д. Егорова, А. Е. Местников, П. С. Абрамова // Горный журнал. – 2016. – № 9. – С. 65-68. – DOI 10.17580/gzh.2016.09.13.
12. *Дегтев, И. А.* Применение пенобетона в гражданском строительстве / И. А. Дегтев, Ю. В. Денисова // Университетская наука. – 2023. – № 1(15). – С. 35-38.
13. Пат. 99042 U1 Российская Федерация. МПК E04G 9/00. Закладные детали из бетона, а также опалубка для возведения стены из легкого бетона с закладными деталями / Смирнов М.Ю.; заявитель и патентообладатель Смирнов М.Ю. – №2010103187/03; заявл. 01.02.2010; опубл. 10.11.2010. – 8 с.
14. *Хахилева, Д. Ю.* Анализ конструкций из легкого бетона для возведения малоэтажных жилых домов / Д. Ю. Хахилева, А. А. Тагилова, О. А. Шутова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2022. – Т. 1. – С. 321-326.
15. *Синянский, И. А.* Использование легкого керамзитобетона для изготовления ограждений наружных стен / И. А. Синянский, О. И. Шипков, Е. В. Орлов // Системные технологии. – 2020. – № 1(34). – С. 53-56.

16. *Konkel, E.V.* General applications and economics of lightweight aggregate concrete / E.V Konkel // National Academies. - 1968. – Vol. 1., P. 147-162.
17. *Баженов, Ю. М.* Способы определения состава бетона различных видов / Ю. М. Баженов. - М.: Стройиздат, 1975. - 182 с.
18. *Епихин, С. Д.* Физико-механические свойства самоуплотняющихся лёгких бетонов на полых микросферах / С. Д. Епихин, А. С. Иноземцев // Современное строительство и архитектура. – 2024. – № 11(54). – DOI 10.60797/mca.2024.54.5.
19. *Горчаков, И. Г.* Строительные материалы / И. Г. Горчаков, Ю. М. Баженов.- М.: Стройиздат, 1986.-688 с.
20. *Inozemtsev, A. S.* Conditions for the Preparation of Self-Compacting Lightweight Concrete with Hollow Microspheres / A. S. Inozemtsev, S. D. Epikhin // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 23. – P. 7288. – DOI 10.3390/ma16237288.
21. *Лесовик, В.С.* Новое поколение строительных композитов на основе пеностекла / В. С. Лесовик, О. В. Пучка, С. С. Вайсера [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 3(59). – С. 146-154.
22. *Лесовик, Р. В.* Крупнопористый бетон для малоэтажного строительства на композиционных вяжущих / Р. В. Лесовик, Д. М. Сопин, А. А. Митрохин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 10. – С. 45-50.
23. *Кудяков, А.И.* Стеновые материалы из наполненных пеностекольных композиций / А.И. Кудяков, С.А. Белых, Т.А. Лебедева. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2016. – 192 с.
24. СП 50.13330.2024 "СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий" от 15.05.2024 № 32-пр // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. - 2024
25. *Першина, Т. А.* Энергоэффективность зданий и способы ее повышения / Т. А. Першина, И. Ю. Сапунова, А. В. Романова // Вклад молодого специалиста в развитие строительной отрасли Волгоградской области: Материалы региональной научно-практической конференции Волгоград,

Волгоград, 17 мая 2013 года / ФГБОУ ВПО "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет". – Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2013. – С. 127-132.

26. *Иноземцев, А. С.* Модель высокопрочного легкого бетона / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 34-41. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-831-12-34-41.

27. *Zaborova, D.* Thermal Stability Influence of the Enclosure Structure on the Building's Energy Efficiency / D. Zaborova, M. Petrochenko, L. Chernenkaya // MATEC Web of Conferences, Tyumen, 27–29 апреля 2016 года. Vol. 73. – Tyumen: EDP Sciences, 2016. – P. 02014. – DOI 10.1051/matecconf/20167302014.

28. *Nemova, D.* Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization / D. Nemova, V. Murgul, A. Golik [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. – 2014. – Vol. 12, No. 1. – P. 37-44. – DOI 10.5937/jaes12-5610.

29. *Gorshkov, A.* Using Life-Cycle Analysis to Assess Energy Savings Delivered by Building Insulation / A. Gorshkov, N. Vatin, D. Nemova [et al.] // International Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (SPbUCEMF-2015), 2015. – P. 1080-1089. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.08.240.

30. *Горчаков, Г. И.* Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г. И. Горчаков, Л. П. Орендлихер, В. И. Савин. - М.: Стройиздат, 1976.-145 с.

31. *Ларионова, З. М.* Формирование структуры цементного камня и бетона / З. М. Ларионова.- М., 1971.- 161 с.

32. *Лыткина, Е. В.* Композиционное вяжущее на основе серпентинитовых пород и портландцемента / Е. В. Лыткина, А. П. Очур-Оол, И. М. Себелев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 12(768). – С. 23-28. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-768-12-23-28.

33. *Кятов, Б. А.* Новые композиционные вяжущие / Б. А. Кятов, А. В. Котляревская, М. А. Чеботарев // Экономика строительства. – 2025. – № 5. – С. 613-615.

34. *Лесовик, В. С.* Разработка композиционных вяжущих с использованием продуктов рециклинга керамического кирпича / В. С. Лесовик, А. С. Сальникова, В. А. Дудченко // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4(65). – С. 21-31. – DOI 10.54734/20722958\_2025\_4\_21.

35. *Чернышева, Н.В.* Оценка влияния тонкомолотого шлака на свойства композиционного гипсового вяжущего / Н. В. Чернышева, И. С. Борисов, Э. К. Сардарбекова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 11. – С. 8-19. – DOI 10.34031/2071-7318-2025-10-11-8-19.

36. *Ильина, Л.В.* Моделирование процессов кинетики цементных композитов, модифицированных кальций-содержащими добавками / Л. В. Ильина, С. В. Самченко, М. А. Раков, Д. А. Зорин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 5. – С. 494-503. – DOI 10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503.

37. *Чернышева, Н.В.* Водостойкость, морозостойкость и водоотталкивающие свойства мелкозернистого бетона на композиционном гипсовом вяжущем / Н. В. Чернышева, М. Ю. Дребезгова, Я. Е. Агафонов [и др.] // Строительные материалы. – 2025. – № 1-2. – С. 60-65. – DOI 10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-60-65.

38. *Мажитов, Е.Б.* Цемент низкой водопотребности как малоклинкерное вяжущее для современных бетонов / Е. Б. Мажитов, А. Ю. Беляков, Е. Г. Гуляков [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – № 2(72). – С. 133-144. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/72.12

39. *Попов, А. Л.* Особенности композиционного вяжущего на кварц-полевошпатовом песке / А. Л. Попов, В. В. Строкова, В. В. Нелюбова // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 12(64). – С. 63-70.

40. *Храмцов, А.Б.* Исследование возможности получения цементов низкой водопотребности на основе промышленных отходов Республики Казахстан / А. Б. Храмцов, Л. А. Урханова, С. А. Вайнбергер, А. О. Вайнбергер // Техника и

технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 173-183. – DOI 10.62980/2076-0655-2025-173-183.

41. *Славчева, Г. С.* Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на дилатометрические эффекты при их замораживании / Г. С. Славчева, Е. М. Чернышов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2015. – № 1(22). – С. 53-62.

42. *Славчева, Г.С.* Структурные факторы обеспечения морозостойкости цементных пенобетонов / Г.С. Славчева // Строительные материалы. – 2015. – № 9. – С. 53–56.

43. *Василовская Н.Г.* Структурные факторы управления прочностью высокопрочного монолитного бетона / Н.Г. Василовская, И.Г. Енджиевская, С.В. Дружинкин, В.А. Зубенко, Е.В. Зырянов // Современные факторы управления прочностью высокопрочного монолитного бетона. - 2012. - №4. - С. 151-157.

44. *Ильина Л. В.* Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона / Л. В. Ильина, С.А. Хакимулина, Д.А. Кадоркин // Фундаментальные исследования. - 2017. - №4-1. - С. 34-38.

45. *Бастрыгина, С. В.* Влияние кремнеземсодержащих добавок на прочностные свойства легкого бетона на пористом заполнителе / С. В. Бастрыгина, Р. В. Конохов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. – 2022. – Т. 1, № 2. – С. 58-66. – DOI 10.37614/2949-1185.2022.1.2.007.

46. *Ильина Л. В.* Легкие бетоны с пеностеклокристаллическим заполнителем, модифицированные микро-и нано-кремнеземом / Л.В. Ильина, Л.Н. Тацки, В.В. Молодин, Т.Д. Колесова // Эксперт: теория и практика. - 2023. - №3 (22). - С. 80-85.

47. *Gencel, O.* A detailed review on foam concrete composites: Ingredients, properties, and microstructure / O. Gencel, T. Bilir, Z. Bademler, T. Ozbakkaloglu // Applied Sciences. - 2022. – Vol. 12 (11), P. 5752. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12115752>

48. *Eliseeva, N.* Regulation of foam stability for non-autoclave foam concrete with additives of colloidal nature // International Scientific Siberian

Transport Forum. - 2021: Springer International Publishing, 2021; Vol. 402, P. 127-135. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_15)

49. *Стещенко, А. Б.* Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих конструкций повышенного качества / А. Б. Стещенко, А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. - 2023. - №15 (5). - С. 408-417.

50. *Коровкин, Д.И.* Влияние комплексных добавок на прочностные показатели высокопрочных мелкозернистых и легких бетонов и фибробетонов в процессе длительного твердения в нормальных влажностных условиях / Д. И. Коровкин, Т. А. Низина, А. С. Балыков, В. В. Володин // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций : Материалы XI академических чтений РААСН - Международной научно-технической конференции, посвященной памяти первого председателя научного совета РААСН "Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов", почетного члена РААСН, доктора технических наук, профессора Зайцева Юрия Владимировича, Саранск, 27–28 ноября 2020 года / Редколлегия: В.И. Травуш, В.П. Селяев, П.А. Акимов [и др.], отв. редактор А.Л. Лазарев. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. – С. 58-66.

51. *Ушеров-Маршак, А.В.* Бетоны нового поколения - бетоны с добавками // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2011. № 1. С. 78-81.

52. *Yazici, H.* The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete / H. Yazici, E. Deniz, B. Baradan // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 42. P. 53-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003>

53. *Zhou, M.* Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering / M. Zhou, W. Lu, J. Song // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 186. P. 1256-1267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036>

54. *Ильина, Л.В.* Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия / Л. В. Ильина, В. В. Молодин, Н. О. Гичко, А. К. Туляганов // *Строительные материалы*. – 2023. – № 7. – С. 36-42. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42.

55. *Шаталов, В. А.* Использование гравитационного смесителя для получения легкого бетона / В. А. Шаталов, О. Л. Бережной, А. В. Шаталов // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Посвящена 165-летию В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2018 года*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 2221-2225.

56. *Рыбалка, В.В.* Поризованный легкий бетон / В. В. Рыбалка, Д. Э. Яковлев, Е. В. Сафенков, А. И. Казанцев // *Будущее науки-2017: Сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах, Курск, 26–27 апреля 2017 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. Том 3*. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2017. – С. 280-283.

57. *Иноземцев, А. С.* Высокопрочные легкие бетоны - конструкционный бетон нового поколения / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // *Технологии бетонов*. – 2014. – № 9(98). – С. 40-44.

58. *Крылов, С. А.* Легкие бетоны на пористых заполнителях / С. А. Крылов // *Аллея науки*. – 2018. – Т. 2, № 1(17). – С. 199-201.

59. *Стаценко, А. Ю.* Механохимическая активация композиционных вяжущих / А. Ю. Стаценко, Е. Н. Кикалишвили, М. С. К. Ш. Аль // *VII Международный студенческий строительный форум - 2022: Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 291-294.

60. *Гаркави, М.С.* Механоактивация в технологии вяжущих систем на основе сульфата кальция / М. С. Гаркави, А. В. Артамонов, Е. В. Колодежная [и др.] // *Строительные материалы*. – 2025. – № 8. – С. 26-31. – DOI 10.31659/0585-430X-2025-838-8-26-31.

61. *Тольпина, Н. М.* Оптимизация дисперсности кварцевого микронаполнителя / Н. М. Тольпина, Е. Н. Хахалева, Д. А. Тольпин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. - 2023. - №1 (89). - С. 150-157.
62. *Аунг, Ч. Н.* Водостойкие композиции на основе гипсовых вяжущих, портландцемента и активных минеральных добавок / Ч. Н. Аунг, Е. Н. Потапова, А. А. Китаева // Бутлеровские сообщения. – 2025. – Т. 81, № 1. – С. 51-62. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/25-81-1-51.
63. *Strokova, V.* White cement-based binder for self-cleaning fine-grained concrete / V. Strokova, Yu. Ogurtsova, E. Gubareva [et al.] // Architecture and Engineering. – 2025. – Vol. 10, No. 3. – P. 96-110. – DOI 10.23968/2500-0055-2025-10-3-96-110.
64. *Махортов, Д.С.* Вяжущие композиции из цемента и керамзитовой пыли / Д. С. Махортов, Л. Х. Загороднюк, Н. А. Шаповалов, Д. А. Сумской // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. - 2022. - №4 (86). - С. 584-596.
65. *Чемеричко, Г.И.* Методы и критерии оценки качества строительных смесей и эффективности процесса смешивания / Г. И. Чемеричко, Н. П. Несмеянов, М. Г. Матусов [и др.] // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 427-430.
66. *Матусов, М.Г.* Методика расчета конструктивных и энергетических параметров смесителей принудительного действия / М. Г. Матусов, Н. П. Несмеянов, Ю. В. Бражник [и др.] // Межвузовский сборник статей "Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов". - Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. - С. 246-249.
67. *Несмеянов, Н.П.* Интенсификация процесса смешивания в смесителях принудительного действия / Н. П. Несмеянов, Ю. В. Бражник, М. Г. Матусов [и др.] // Межвузовский сборник статей "Энергосберегающие

технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов". - Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. - С. 139-142.

68. *Дюсембинов, Д. С.* Производство пенобетонных изделий метод двухстадийного введения пены / Д. С. Дюсембинов // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. - 2013. - №3. - С. 134-138.

69. *Винокуров, О.Н.* Опыт производства и применения неавтоклавных ячеистых бетонов / О.Н. Винокуров // Строительные материалы. -1986.-№7.-С.6-8.

70. *Красильников, И. В.* Современное представление о пористой структуре цементного камня и бетона / И. В. Красильников, М. Н. Наместников // Инженерные и социальные системы. - Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2022. - С. 9-17.

71. *Шейкин, А.Е.* Структура и свойства цементных бетонов / А.Е.Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с

72. *Иванов, Ф.М.* Биоповреждения в строительстве / Под ред. Ф.М. Иванова. – М.: Стройиздат, 1984. – 320 с

73. *Skoczylas, K.* The effects of low curing temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica / K. Skoczylas, T. Rucinska // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. - 2019. – Vol. 5. - P. 536-544.

74. *Verbeck, G.* Structures and Physical Properties of Cement Paste / Verbeck G.,Helmuth R.A // Proc.Fifth Internat.Symp.Chem.of Cement. - Tokyo: 1968. - P. 1-32.

75. Пат. 2775585 С9 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Наномодифицированный высокопрочный легкий бетон на композиционном вяжущем / Гришина А. Н., Иноземцев А. С., Королев Е. В.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет". – № 2021136553: заявл. 10.12.2021; опубл. 22.08.2022, Бюл. №24 – 8 с.

76. Пат. 2773899 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Легкий строительный композит / Иноземцев А.С., Королев Е.В.; заявитель и правообладатель

Общество с ограниченной ответственностью «Московский бетонный завод». – № 2021130527: заявл. 20.10.2021: опубл. 14.06.2022, Бюл. №17 – 7 с.

77. *Попов, Н.А.* Подбор состава легких бетонов на искусственных пористых заполнителях / Н.А. Попов, М.П. Элинзон, Я.Ш. Штейн. - М.: Стройиздат, 1973. - 83 с

78. *Иванов, И. А.* Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях / И.А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1974. - 279 с.

79. *Ильина, Л.В.* Современные тенденции развития и анализ эффективности использования легких бетонов / Л. В. Ильина, Б. Ш. Ризаев, Э. С. Жураев // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). - 2018. - №4. - С. 29-36.

80. *Давидюк, А. Н.* Конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях для эффективных ограждающих конструкций / А. Н. Давидюк // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4(12). – С. 72-80.

81. *Сопегин, Г.В.* Подбор состава конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе гранулированного пеностекла с применением аппарата математического планирования эксперимента / Г. В. Сопегин, Н. С. Семейных // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №. 4 (55). – С. 60

82. *Балыков, А. С.* Прогнозирование прочности при сжатии и проектирование составов конструкционных легких бетонов с применением методов машинного обучения / А. С. Балыков, Е. А. Каледина, С. В. Володин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 171-186. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-171-186>

83. *Бартеньева, Е. А.* Цементно-зольный фибропенобетон естественного твердения / Е. А. Бартеньева, А. Е. Куралов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 8(146). – DOI 10.60797/IRJ.2024.146.37.

84. *Кульшикова, С. Т.* Эффективное использование топливных шлаков ТЭС в мелкозернистых бетонах / С. Т. Кульшикова // *Colloquium-Journal*. – 2019. – № 2-1(26). – С. 33-35.

85. *Назиров, Р.А.* Гидравлическая активность высококальциевой золы-уноса с добавками техногенного происхождения / Р. А. Назиров, А. М. Жжонных, А. С. Самойло, Н. С. Новиков // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2025. – № 3(795). – С. 19-31. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-795-3-19-31.

86. *Белов, В.В.* К вопросу проектирования эффективных строительных конструкций из зольного неавтоклавного газобетона / В. В. Белов, П. В. Куляев, Т. Р. Баркая [и др.] // *Эксперт: теория и практика*. – 2025. – № 4(31). – С. 28-33. – DOI 10.51608/26867818\_2025\_4\_28.

87. *Джусупова, М. А.* Получение мелкозернистого бетона с использованием золы гидроудаления / М. А. Джусупова, С. Т. Кульшикова // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова*. – 2018. – № 4(62). – С. 99-103.

88. *Истомина, К. Р.* Возможные технологии использования золы уноса / К. Р. Истомина, А. М. Бургонутдинов, К. А. Хусаинова // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. – 2022. – №. 1. – С. 36-44.

89. *Успенский, С.К.* Переработка и подготовка золошлаковых материалов к использованию / С.К. Успенский // *Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11»*. – 2007. – С. 93–111.

90. *Абрамов, А. К.* Аглопорит, полученный из отходов углеобогащения, как заполнитель для легких бетонов / А. К. Абрамов, В. И. Ефимов, И. Б. Никулин // *Научный вестник Московского государственного горного университета*. – 2013. – № 11. – С. 3-11.

91. *Арутюнян, М. Р.* Легкие бетоны на основе пеностеклогранулята с насыпной плотностью 200-350 кг/м<sup>3</sup> и их основные физико-механические и

теплофизические свойства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Арутюнян Маргарита Размиковна. – Москва, 1991. – 18 с.

92. Пат. 2272007 С1 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Шихта для производства пеноцеолита / Верещагин В.И., Соколова С.Н., Казанцева Л.К.; заявитель и правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет. – № 2004127318/03: заявл. 13.09.2004: опубл. 20.03.2006, Бюл. №8. – 5 с.

93. Пат. 2723886 С1 Российская Федерация, МПК С03С 11/00, С04В 20/04. Способ изготовления гранулированного пеностеклокерамического заполнителя / Матвеева О. И., Орлов А. Д., Попов П. М., Семенов К. В.; заявители и патентообладатели Акционерное общество "Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства", Общество с ограниченной ответственностью "Сунтарэнерго". – № 2019130063: заявл. 25.09.2019: опубл. 18.06.2020, Бюл. №17. – 7 с.

94. Местников, А. Е. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов / А. Е. Местников, С. С. Семенов, Д. В. Васильева // Фундаментальные исследования. 2017. №. 12-1. С. 80-84

95. Аноприенко, Д. С. Влияние пенообразователя на свойства сверхлегкого пенобетона / Д. С. Аноприенко, А. В. Рафаелян, С. А. Мухторов // VII Международный студенческий строительный форум - 2022: Сборник докладов VII Международного студенческого строительного форума, Белгород, 24 ноября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 202-207.

96. Ахмедов, М. Ф. Пенообразователи для производства пенобетона / М. Ф. Ахмедов, А. Шарифов, Г. Г. Шодиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 146-150.

97. *Михеенков, М. А.* Сравнительная характеристика синтетических и органических пенообразователей / М. А. Михеенков // Популярное бетоноведение. – 2008. – № 3. – С. 51-54.

98. *Силюк, Е.А.* Влияние различных видов пенообразователей на свойства пенобетона / Е. А. Силюк, М. В. Демерчан, Ю. В. Филимонов, И. Л. Чулкова // Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и применение: материалы Международного симпозиума, Новосибирск, 15–17 декабря 2020 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2020. – С. 54-59.

99. *Рахмонов, Н. Э.* Проблемы разработки отечественного синтетического пенообразователя / Н. Э. Рахмонов // Academy. – 2020. – № 11(62). – С. 93-95. – DOI 10.24411/2412-8236-2020-11108.

100. *Иванов, И. А.* Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона / И. А. Иванов, В. М. Жмыхов // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 33-35.

101. *Горбач, П. С.* Эффективный пенобетон на синтетическом пенообразователе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Горбач Павел Сергеевич. – Улан-Удэ, 2007. – 23 с.

102. *Балясников, В. В.* Пенобетон на модифицированных синтетических пенообразователях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Балясников Виктор Викторович. – Белгород, 2003. – 235 с.

103. *Кобзев, В. А.* Влияние органических модификаторов на стабильность пенных систем / В. А. Кобзев, В. В. Нелюбова, А. А. Безродных // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2017. – № 8. – С. 86-89.

104. *Хирис, Н. С.* Анализ влияния шлакового микронаполнителя на процессы формирования структуры высоконаполненного мелкозернистого бетона / Н. С. Хирис, Т. К. Акчурин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – №. 33. – С. 97-101.

105. *Муртазаев, С.А.Ю.* Утилизация отсева дробления бетонного лома / С. А. Ю. Муртазаев, З. Х. Исмаилова, А. А. Хасиев, М. Р. Нахаев // Экология и промышленность России. – 2012. – № 8. – С. 26-28.

106. *Зайченко, Н. М.* Конструкционный лёгкий бетон с внутренним уходом / Н. М. Зайченко, С. В. Лахтарина // Строитель Донбасса. – 2018. – № 1(2). – С. 7-16.

107. *Subasi, S.* The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate / S. Subasi // Scientific Research and Essay. – Vol. 4 (4), April 2009. – pp. 275-288

108. *Долгова, А. В.* Влияние дозировки ретиспергируемых порошков и типа низко модульных включений на свойства мелкозернистого бетона / А. В. Долгова, Г. В. Несветаев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 167-175. – DOI 10.21822/2073-6185-2019-46-2-167-175.

109. *Баранова, А. А.* Свойства матрицы пенобетона на синтетическом и протеиновом пенообразователях / А. А. Баранова, А. И. Савенков // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2014. – Т. 1. – С. 44.

110. *Пучка, Б.В.* Композиционные вяжущие для тепло- и звукоизоляционных стеклокомпозитов / О. В. Пучка, Б. В. Козленко, А. А. Ахмед [и др.] // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека: II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгород, 04–05 декабря 2019 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 609-613.

111. *Федюк, Р. С.* Свойства композиционных вяжущих на основе техногенных отходов Дальнего Востока / Р. С. Федюк // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2(55). – С. 132-136.

112. *Федюк, Р. С.* Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений / Р. С. Федюк, А. В. Мочалов, В. С.

Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2018. – №. 7. – С. 77-85

113. *Кузнецова, Н. В.* Физико-механические свойства цементных композиционных строительных материалов с применением отходов производства ЦСП / Н. В. Кузнецова, О. С. Барина // Строительные материалы. – 2017. – №. 6. – С. 7-9.

114. *Казлитина, О. В.* Фибробетон для монолитного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Казлитина Ольга Викторовна. – Белгород, 2013. – 23 с.

115. *Лесовик, Р. В.* Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Лесовик Руслан Валерьевич. – Белгород, 2009. – 43 с

116. *Барахтенко, С. В.* Строительный композиционный материал на основе отходов поливинилхлорида и золы уноса теплостанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Барахтенко Вячеслав Валерьевич. – Иркутск, 2014. – 236 с.

117. *Строкова, В. В.* Перспективы использования вулканического песка Эквадора для производства мелкозернистых бетонов / В. В. Строкова, Н. И. Алфимова, Ф. А. Наваретте Велос [и др.] // Строительные материалы. – 2009. – № 2. – С. 32–33.

118. *Лесовик, В.С.* Энергоэффективные газобетоны бетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства / В. С. Лесовик, Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Известие вузов. Строительство. – 2012. – №3. – С. 10–20.

119. *Лесовик, Р.В.* О возможности использования техногенных песков в качестве сырья для производства строительных материалов\* / Р. В. Лесовик, Н. И. Алфимова, М. Н. Ковтун [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – №2. – С. 10–15.

120. *Курбатов, В.Л.* Стеновые блоки из мелкозернистого бетона на основе техногенного песка Северного Кавказа / В. Л. Курбатов, Р. В. Лесовик, Н. Д. Комарова [и др.] // Строительные материалы. – 2006. – № 11. – С. 87–89.

121. Трунов, П. В. К вопросу о повышении эффективности композиционных вяжущих / П. В. Трунов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2014. – №. 5. – С. 79-84.

122. Iwase, T. A new sound tube measuring method for propagation constant in porous material: Method without any air space at the back of test material / T. Iwase, Y. Izumi // J. Acoust. Soc. Japan. – 1996. – Т. 52. – Vol. 6. – P. 411-419.

123. Mastali, M. Mechanical and acoustic properties of fiber-reinforced alkali-activated slag foam concretes containing lightweight structural aggregates / M. Mastali, P. Kinnunen, H. Isoaho [et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 187. – P. 371-381.

124. Mašović, D.B. On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation / D. B. Mašović, D. S. Š. Pavlović, M. M. Mijić, J. // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2013. Vol. 5. – P. EL420-EL425.

125. Елистраткин, М.Ю. Композиционные вяжущие для отделочных составов / М. Ю. Елистраткин, А. В. Минакова, А. Н. Джамиль [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 37-44.

126. Рахимов, Р. З. Плотность упаковки зерен композиционного гипсового вяжущего в зависимости от дисперсности и гранулометрического состава / Р. З. Рахимов, А. Р. Гайфуллин, М. И. Халиуллин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №. 7. – С. 129-131.

127. Лесовик, В. С. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих / В. С. Лесовик, М. С. Агеева, А. В. Иванов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2011. – №. 3. – С. 29-32.

128. Лесовик, В. С. Использование композиционных вяжущих для повышения долговечности брусчатки бетонной / В. С. Лесовик, М. С. Агеева, Ю. В. Денисова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2011. – №. 4. – С. 52-54.

129. Лесовик, В. С. Композиционное вяжущее на основе комплексного органоминерального модификатора для сухих ремонтных смесей / В. С. Лесовик, Л.

Х. Загороднюк, А. В. Шамшуров [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2014. – №. 5. – С. 25-31.

130. *Федюк, Р. С.* Повышение непроницаемости фибробетонов на композиционном вяжущем / Р. С. Федюк // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – №. 2 (55). – С. 154-163.

131. *Строкова, В. В.* Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах / Строкова, В. В., Нелюбова, В. В., Боцман, Л. Н. [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2016. – №. 11. – С. 36-42.

132. *Сулейманова, Л. А.* Специальное композиционное вяжущее для газобетонов неавтоклавного твердения / Л. А. Сулейманова, И. В. Жерновский, А. В. Шамшуров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2012. – №. 1. – С. 39-45.

133. *Рахимова, Н. Р.* Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов\* / Н. Р. Рахимова // Строительные материалы. – 2008. – № 9. – С. 77-80.

134. *Городецкий, И. В.* Проектирование композиционного вяжущего для уплотнения структуры цементного камня / И. В. Городецкий, Ю. Ю. Ильинский, А. А. Ахмед // Эффективные строительные композиты: Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича, Белгород, 02–03 апреля 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 122-126.

135. *Лесовик, Г. А.* Влияние тонкости помола наполнителя композиционного вяжущего на его активность / Г. А. Лесовик, С. В. Вашева, Я. Р. Лесовик // Научно-практические технологии и инновации (XXV научные чтения): Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 281-285.

136. *Ishangali, A. B.* Effective composite materials based on mineral binders / A. B. Ishangali, K. Akmalayuly // *Science and Innovative Technologies*. – 2023. – Vol. 1(26). – P. 135-142. – DOI 10.33942/sit042255.

137. *Ребиндер, П.А.* Исследования в области прикладной физико-химии поверхностных явлений: Исследования по теории флотации. Поверхностные явления в обработке металлов и сплавов. Физ.-химия бурения и дробления (измельчения) / Под науч. руководством и ред. проф. П. А. Ребиндер, Н. А. Калиновская, М. Е. Липец [и др.] – М.; Л.: Онти. Глав. ред. лит-ры по цветной металлургии, 1936. – 299 с.

138. *Павленко, Н.В.* Модифицированное вяжущее с использованием нанокристаллических компонентов для ячеистых композитов / Н.В. Павленко, А.Б. Бухало, В.В. Строкова [и др.] // *Строительные материалы*. – 2013. – № 2. – С. 20–24.

139. *Бухало, А.Б.* Теплоизоляционный неавтоклавный пеногазобетон с нанодисперсными модификаторами: монография / А.Б. Бухало, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова. – Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – 137 с

140. *Нелюбова, В.В.* Особенности наноструктурированного вяжущего в зависимости от генезиса сырья / В.В. Нелюбова, В.А. Кобзев, М.Н. Сивальнева [и др.] // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2015. – № 2. – С. 25–29.

141. *Чернышев, А.Ю.* Использование отходов ММС железистых кварцитов для разработки долговечных составов ГЦПВ / А.Ю. Чернышев, Р.В. Лесовик // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. – 2003. – № 5. – С. 319–321.

142. *Лесовик, Р.В.* О влиянии генетических особенностей сырья и технологии на морфологию продуктов дробления / Р.В. Лесовик, Е.И. Ходыкин, Д.М. Сопин [и др.] // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2007. – № 8. – С. 22–23.

143. *Лесовик, Р.В.* Комплексное использование отходов алмазобогащения / Р.В. Лесовик, М.Н. Ковтун, Н.И. Алфимова // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2007. – № 8. – С. 30–31.

144. *Дороганов, Е.А.* Мелкозернистый бетон на основе модифицированной высококонцентрированной вяжущей суспензии кварцевого песка / Е.А. Дороганов, В.С. Лесовик, Н.Г. Передереев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 7. – С. 55–58.

145. *Алфимова Н.И.* Мелкозернистые бетоны на основе вулканического сырья: монография / Н.И. Алфимова, В.В. Строкова, В.Ф.А. Наваретте // Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2014. – 94 с.

146. *Трунов, П.В.* К вопросу об использовании вулканического сырья камчатки в качестве минеральной добавки / П.В. Трунов, Н.И. Алфимова, В.С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 4. – С. 84–89.

147. *Вишневская, Я.Ю.* Перспективы повышения эффективности фибробетонов за счет применения композиционных вяжущих / Я.Ю. Вишневская. Т.В. Трунов, В.В. Калатоzi [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 35-37.

148. *Строкова, В.В.* Мелкозернистый бетон на основе сырья Ханты-мансийского АО для монолитного строительства / В.В. Строкова, Л.Н. Соловьева, А.П. Гринев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 74–77.

149. *Шейченко, М.С.* Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения / М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 5. – С. 15–19.

150. *Алфимова, Н.И.* Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении / Н.И. Алфимова, В.В. Калатоzi, С.В. Карацупа [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 85–89.

151. *Кобзев, В.А.* Высококонцентрированная алюмосиликатная вяжущая суспензия из гранодиорита / В.А. Кобзев, М.Н. Нелюбова, В.В. Нелюбова //

Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 1. – С. 12–18.

152. *Кайс, Х. А.* Свойства природного цеолита для получения высокопрочного мелкозернистого бетона / Х. А. Кайс, Н. Н. Морозова // Строительные материалы. – 2017. – №. 6. – С. 63-68.

153. *Vogiatzis, D.* Hellenic natural zeolite as a replacement of sand in mortar: mineralogy monitoring and evaluation of its influence on mechanical properties / D. Vogiatzis, N. Kantiranis, A. Filippidis [et al.] Geosciences. – 2012. – Vol. 2. – P. 298–307.

154. *Shi, C.* Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part II—Reaction products and mechanism //Cement and Concrete Research. – 2000. –Vol. 4. – P. 607-613

155. *Ланкин, С.В.* Свойства бетонов с минеральными добавками с позиции статистики затвердевающих сред / С.В. Ланкин, А.В. Рыженко, В.Х. Рыженко // Научно-технический вестник Поволжья. - Казань, 2013. - № 4. - С. 57-61.

156. *Рыженко, В.Х.* Бетоны, модифицированные добавками, для малоэтажного строительства / В.Х. Рыженко, А.В. Рыженко // Благовещенск: Изд-во ДальГАУ. – 2011. – Т. 166. – №. 1

157. *Рыженко, А. В.* Влияние природных цеолитов на свойства бетонов / А. В. Рыженко, В. Р. Даки, В. Х. Рыженко // Строительство и природообустройство. – 2016. – С. 95-101

158. *Лам, Т. В.* Влияние добавки золошлакового отхода на свойства сульфоалюминатного портландцемента / Т. В. Лам, Н. З. Т. Лам, С. В. Самченко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – №. 8 (131). – С. 991-1003.

159. *Сорокина, А. В.* Композиционное гипсовое вяжущее с использованием золо-шлаковых отходов / А. В. Сорокина, А. Х. Аласханов // Экологические проблемы горнопромышленных регионов. – 2022. – С. 232.

160. *Смиренская, В. Н.* Цеолитсодержащие вяжущие повышенной водостойкости и изделия на их основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Смиренская Вера Николаевна. – Томск, 1998. – 23 с.

161. *Маркова, Л. Н.* Оценка пуццолановой активности природных цеолитов и их использование при получении стеновых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Маркова Лариса Николаевна. – Барнаул, 1998. – 18 с.

162. *Дмитриев, В. Д.* Применение легкобетонных блоков в ограждающих конструкциях / В.Д. Дмитриев // Актуальные проблемы науки и техники. 2019: Материалы национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 марта 2019 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2019. – С. 840-841.

163. *Самойлов, К. А.* Легкий бетон как материал для стеновых конструкций / К. А. Самойлов, А. А. Антипина // AlfaBuild. – 2018. – №. 1. – С. 55-64.

164. *Жигулина, А. Ю.* Применение легкобетонных ограждающих конструкций для повышения комфортности жилья / А. Ю. Жигулина, А. Г. Чикноворьян, С. А. Мизюряев // Градостроительство и архитектура. – 2020. – Т. 10. – №. 2. – С. 57-61.

165. *Гринвальд, Д. В.* Конструкционный керамзитобетон для монолитного строительства / Д. В. Гринвальд, Е. Н. Грибков, С. В. Мосиевских // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2021. – № 1. – С. 289-292.

166. *Inozemtcev, A.* Lightweight concrete for 3D-printing with internal curing agent for Portland cement hydration / A. Inozemtcev, E. Korolev, T. Q. Duong // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 1(109). – DOI 10.34910/MCE.109.15.

167. *Зыонг, Т. К.* Комплексное модифицирование легких бетонов на полых микросферах для технологии 3D-печати / Т. К. Зыонг, Е. В. Королев, А. С. Иноземцев // Бетон и железобетон. – 2021. – № 3(605). – С. 25-29.

168. *Ахвердов, И. Н.* О научных проблемах в области легких бетонов / И. Н. Ахвердов // Аглопорит и аглопоритобетон. – Минск, 1964. – С. 12–20

169. *Ваганов, А.И.* Керамзитобетон / А.И. Ваганов. – М.: Госстройиздат, 1976. – 136 с.

170. *Симонов, М.З.* Основы технологии легких бетонов / М.З. Симонов. – М.: Стройиздат, 1973. – 584 с.

171. *Симонов, М.З.* О начальном модуле упругости легкого бетона на природных вулканических пористых заполнителях / М.З. Симонов, С.Н. Евсеева // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 98-103.

172. *Корнилович, Ю.Е.* О формуле прочности легких бетонов / Ю.Е. Корнилович, Ю.Д. Нагиевский // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и их применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 90-97

173. *Бужевич, Г.А.* Исследование по крупнопористому бетону на пористых заполнителях / Г.А. Бужевич. – М.: Госстройиздат, 1962. – 142 с.

174. *Ицкович, С.М.* Крупнопористый бетон / С.М. Ицкович. – М.: Стройиздат, 1977. – 117 с.

175. *Берг, О.Я.* Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. - 207 с.

176. *Виноградов, Б. Н.* Влияние заполнителей на свойства бетонов. / Б.Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1979. – 223 с

177. *Москвин, В.М.* Бетон для строительства в суровых климатических условиях / В. М. Москвин, М. М. Капкин, А. Н. Савицкий [и др.]. – Л.: Стройиздат, 1973. 172 с.

178. *Логвиненко, А. Т.* Процессы гидратации и твердения зольных вяжущих материалов / А. Т. Логвиненко, М. А. Савинкина //Твердение вяжущих веществ. Уфа, 1974. -С.271-273.

179. *Дворкин, Л. И.* Золосодержащие вяжущие низкой водопотребности и бетоны на их основе / Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницкий, В. В. Марчук // Технологии бетонов. – 2012. – № 5-6(70-71). – С. 24-27.

180. *Бирюков, В.В.* Эффективные направления крупномасштабного использования золошлаковых отходов / В. В. Бирюков, С. Е. Метелев, В. В. Сиротюк [и др.] //Сибирский торгово-экономический журнал. – 2008. – №. 7. – С. 66-70

181. *Макаренко, С.В.* Влияние зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС ОАО «Иркутскэнерго» на свойства цемента / С. В. Макаренко, Д. И. Баишев, О.

В. Хохряков [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №. 4 (30). – С. 278-283.

182. *Павленко, В.И.* Рентгеноструктурный анализ строительных материалов / В. И. Павленко, Г. М. Фофанов. – Белгород: М.: БТИСМ, МИСИ, 1983. – 74 с

183. *Бутт, Ю.М.* Практикум химической технологии вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа. – 1973. – 504 с

184. *Кузнецова, Т.В.* Физическая химия вяжущих материалов: учебник для вузов / Т. В. Кузнецова, И. В. Кудряшов, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа. – 1989. – 384 с.

185. *Данилович, И.Ю.* Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов / И. Ю. Данилович, Н. А. Сканави. – М.: Высшая школа. – 1988. – 281 с.

186. *Будников, П.П.* Реакция в смесях твердых веществ / П. П. Будников, А. М. Гинстлинг. – М.: Стройиздат. – 1971. – 420 с

187. *Белогурова, Т. П.* Исследование процессов гидратации золоцементных вяжущих / Т. П. Белогурова, И. А. Миханошина, А. Т. Беляевский // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – №. 5 (31). – С. 513-518.

188. *Епихин, С. Д.* Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах / С. Д. Епихин, А. С. Иноземцев // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, № 1. – С. 135-148. – DOI 10.22227/2305-5502.2024.1.9.

189. *Kearsley, E.P.* The effect of porosity on the strength of foamed concrete / E. P. Kearsley, P. J. Wainwright // Cement and Concrete Research. – 2002. – Vol. 32. – No. 2. – P. 233–239.

190. *Бутт, Ю.М.* Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1973. – 504 с.

191. *Рахимбаев, Ш. М.* Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытаний / Ш. М. Рахимбаев, Н. М. Авершина // Строительные материалы. – 1994. – №. 4. – С. 17-18.

192. *Рахимбаев, Ш.М.* Кинетика переноса в гетерогенных процессах технологий строительных материалов // Физико-химия строительных и композиционных материалов: сб. науч. тр. Белгород: Изд-во БТИСМ. – 1989. – С. 160–164.

193. *Мартыненко, В.А.* Необходимые свойства пенообразователей для производства пенобетона / В.А. Мартыненко // Строительные материалы и изделия. – 2001. – №3. – С. 32–34.

194. *Попов, А.Л.* Исследование отходов пеностеклового производства как компонента композиционного вяжущего / А. Л. Попов, А. В. Фёдоров // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – № 1(73). – С. 60-68.  
DOI: 10.36622/2541-7592.2024.73.1.005

195. *Алфимова, Н. И.* Повышение эффективности использования продуктов вулканической деятельности / Н. И. Алфимова, Н. Н. Шаповалов, Е. Е. Шадский [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2015. – №. 5. – С. 11-15.

196. *Шаталова, С. В.* Влияние размолоспособности минеральных добавок на энергоёмкость композиционного гипсового вяжущего / С. В. Шаталова, Н. В. Чернышева, В. В. Воронов [и др.] // Теоретические основы создания эффективных композитов. – 2018. – С. 318-325.

197. *Айзенштадт, А. М.* Интегральные показатели качества отработанного бетона для вторичного использования / А. М. Айзенштадт, В. Е. Данилов, Т. А. Дроздук [и др.] // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13. – №. 5. – С. 276.

198. *Загороднюк, Л. Х.* Сталеплавильный шлак-малоэнергоёмкий наполнитель композиционных материалов / Л.Х Загороднюк // Сухие строительные смеси. – 2012. – №. 1. – С. 14-15.

199. *Ларсен, О. А.* Исследование свойств активных минеральных добавок для применения в гидротехническом строительстве / О. А. Ларсен, О. В. Александрова, В. В. Наруть [др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2020. – №. 8. – С. 8-17.

200. *Фахртдинова, О. А.* Исследование свойств модифицированного шивыртуйского цеолита / О. А. Фахртдинова, О. Б. Назаренко, Д. В. Мартемьянов [и др.] // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XX Всероссийской научно-технической конференции, 2-4 декабря 2014 г., Томск. Т. 2. —Томск, 2014. — Изд-во ТПУ, 2014.

201. *Панина, Т. И.* Эффективность применения комплексной наномодифицирующей добавки на основе цеолитов в строительных материалах / Т. И. Панина, Ю. Н. Толчков, А. Г. Ткачев [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. — 2016. — Т. 8. — №. 5. — С. 116-132.

202. *Юсупов, А. Р.* Исследование цеолитсодержащих кремнистых пород Дагестана для получения минеральной добавки в цемент / А. Р. Юсупов, С. А. Мамаев, З. А. Юсупов [и др.] // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. — 2021. — №. 10 (322). — С. 42-46.

203. *Жидик, И. Ю.* Влияние цеолита природного Холинского месторождения на минеральный и витаминный состав мяса кроликов / И. Ю. Жидик, М. В. Заболотных // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2016. — №. 6. — С. 144-148.

204. *Lilkov, V.* Physical and mechanical characteristics of cement mortars and concretes with addition of clinoptilolite from Beli Plast deposit (Bulgaria), silica fume and fly ash / V. Lilkov, I. Rostovsky, O. Petrov // Clay minerals. — 2011. — Vol.46(2). — P.213-223.

205. *Uzal, B.* Blended Cements Containing High Volume of Natural Zeolites: Properties, Hydration and Paste Microstructure / B. Uzal, L. Turanli // Cement and Concrete Composites. — 2012. — Vol. 34. — Pp. 101–109.

206. *Liu, D.* Freeze-thaw damage evaluation and model creation for concrete exposed to freeze–thaw cycles at early-age / D. Liu, Y. Tu, G. Sas, L. Elfgren // Construction and Building Materials. — 2021. — Vol. 312. — P. 125352. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.125352.

207. *Peng, G.F.* The Effects of Air Entrainment and Pozzolans on Frost Resistance of 50-60 MPa Grade Concrete/ G. F. Peng, Q. Ma, H. M. Hu [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2007. – Vol.21. – Pp. 1034-1039

208. *Жиркова, Л. В.* Водостойкое магниальное вяжущее для малоэтажного строительства в условиях Якутии / Л. В. Жиркова, А. Д. Егорова // *Фундаментальные основы строительного материаловедения: Сборник докладов Международного онлайн-конгресса, Белгород, 06–11 октября 2017 года*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 988-995.

209. *Поспелова, М. А.* Регулирование кинетики твердения цементных систем химическими добавками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Поспелова Марина Алексеевна. – Белгород, 2003. – 130 с.

210. *Фоменко, Ю. В.* Мелкозернистый бетон для тротуарной плитки с пониженным высолообразованием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Фоменко Юлия Владимировна. – Белгород, 2007. – 220 с.

211. *Рахимбаев, Ш.М.* Расчет констант скорости некоторых процессов технологии строительных материалов / Ш.М. Рахимбаев // *Проблемы материаловедения и совершенствование технологии производства строительных изделий* // Белгород: БТИСМ. – 1990. – 184 с.

212. *Аниканова, Т. В.* Применение теории переноса при исследовании долговечности теплоизоляционных материалов / Т. В. Аниканова, А. С. Погромский, Н. В. Павленко // *Строительные материалы*. – 2024. – № 6. – С. 21-25. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-825-6-21-25.

213. *Ильина, Л. В.* Упрочнение цемента путем ввода тонкодисперсных минеральных добавок / Л. В. Ильина, Н. О. Гичко, А. К. Туляганов // *Цемент и его применение*. – 2022. – № 3. – С. 52-55.

214. *Бурьянов, А.Ф.* Модифицированные гипсовые безобжиговые композиты / В. Б. Петропавловская, Т. Б. Новиченкова, Ю. Ю. Полеонова // *Строительные материалы*. – 2013. – № 5. – С. 76-78

215. *Лесовик, В.С.* Влияние составов материалов на формирование структуры строительных материалов / В. С. Лесовик, И. Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – №. 4 (44). – С. 69-79.

216. *Войтович, Е.В.* Повышение эффективности цементных вяжущих с активным минеральным нанодисперсным компонентом / Е. В. Войтович, И. Л. Чулкова, Е. В. Фомина [и др.] // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2015. – №. 5 (45). – С. 56-62

217. *Фомина, Е.В.* Особенности применения предварительно гашеной извести в ячеистых бетонах автоклавного твердения / Е. В. Фомина, В. В. Строкова, Н. П. Кудеярова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – № 5(653). – С. 29-34.

218. *Чижев, Р.В.* Фазаобразование и свойства алюмосиликатных вяжущих негидратационного типа твердения с использованием перлита / Р. В. Чижев, Н. И. Кожухова, И. В. Жерновский // Строительные материалы. – 2015. – №. 3. – С. 34-36.

219. *Череватова, А.В.* Особенности реотехнологических свойств наноструктурированного алюмосиликатного вяжущего в присутствии комплексных модификаторов различной природы / А. В. Череватова, Н. И. Кожухова, М. С. Осадчая [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2016. – №. 9. – С. 36-39.

220. *Строкова, В.В.* Особенности механизма твердения наноструктурированного вяжущего / В. В. Строкова, М. Н. Сивальнева, И. В. Жерновский // Строительные материалы. – 2016. – №. 1-2. – С. 62-65.

221. *Чижев, Р.В.* Алюмосиликатные бесклинкерные вяжущие и области их использования / Р. В. Чижев, Н. И. Кожухова, В. В. Строкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2016. – №. 4. – С. 6-10.

222. *Bonaccorsi, E.* The crystal structure of jennite,  $\text{Ca}_9\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  / E. Bonaccorsi, S. Merlino, H. F. W. Taylor // Cement and Concrete Research. – 2004. – Vol. 34. – No. 9. – P. 1481-1488.

223. *Churakov, S. V.* Hydrogen bond connectivity in jennite from ab initio simulations / S.V. Churakov // *Cement and concrete research*. – 2008. – Vol. 38. – No. 12. – P. 1359-1364.
224. *Sobolev, K.* How nanotechnology can change the concrete world / K. Sobolev, M. F. Gutiérrez // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2005. – Vol. 84. – No. 10. – P. 14.
225. *Sanchez, F.* Nanotechnology in concrete—a review / F. Sanchez, K. Sobolev // *Construction and building materials*. – 2010. – Vol. 24. – No. 11. – P. 2060-2071.
226. *Нахаев, М. Р.* Закономерности протекания процессов формирования структуры и прочности бесклнкерного вяжущего щелочной активации / М. Р. Нахаев, М. Ш. Саламанова, З. Х. Исмаилова // *Строительные материалы и изделия*. – 2020. – Т. 3, № 1. – С. 21-29.
227. *Полонина, Е. Н.* Конструкционный бетон, модифицированный комплексной добавкой, содержащей гидротермальный нанокремнезем и углеродные нанотрубки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Полонина Елена Николаевна. – Минск, 2022. – 29 с.
228. *Бужевич, Г. А.* Технология и свойства новых видов легких бетонов на пористых заполнителях / Г.А. Бужевич // М.: Стройиздат. – 1971.
229. *Бужевич, Г.А.* Легкие бетоны на пористых заполнителях / Г.А. Бужевич // М.: Стройиздат, 1970. - 272 с.
230. *Бужевич, Г.А.* Керамзитобетон / Г. А. Бужевич, И. С. Хаймов // *Технология и свойства новых видов легких бетонов на пористых заполнителях*. М.: Стройиздат. – 1971. – С. 54-71.
231. *Бужевич Г.А.* Аглопорито-перлитобетон для ограждающих конструкций / Г. А. Бужевич, С. М. Каган // *Технология и свойства новых видов легких бетонов на пористых заполнителях*. М.: Стройиздат. – 1971. – С. 134-151.
232. *Иноземцев, А. С.* Высокопрочные лёгкие бетоны: монография / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев. – Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2022. – 192 с.
233. *Строцкий, В. Н.* Прочностные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике / В. Н. Строцкий, В. И. Савин, В. В. Полетаев // *Бетон и железобетон*. – 2023. – Т. 616. – №. 2. – С. 14-30.

234. Айсен Николаев предложил принять меры стимулирования для вовлечения в промышленный оборот золошлаковых материалов Подробнее: <https://www.sakha.gov.ru/news/17126> // Официальный информационный портал Республики Саха (Якутия) URL: <https://www.sakha.gov.ru/news/17126> (дата обращения: 21.12.2025).

235. *Давидюк, А. Н.* Конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на стекловидных пористых заполнителях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Давидюк Алексей Николаевич. – Ростов-на-Дону, 2010. – 48 с.

236. *Смирнова, О. Е.* Легкий бетон на основе поликомпонентного органического заполнителя / О. Е. Смирнова, А. П. Пичугин, В. Ф. Хританков // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4(23). – С. 108-114. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_4\_108.

237. *Ильина, Л. В.* Легкие бетоны с пеностеклокристаллическим заполнителем, модифицированные микро- и нано-кремнеземом / Л. В. Ильина, Л. Н. Тацки, В. В. Молодин, Т. Д. Колесова // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 3(22). – С. 80-85. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_3\_80.

238. *Ilina, L.* Aerated dry mix concrete for remote northern territories / L. Ilina, A. Kudyakov, M. Rakov // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 5(113). – DOI 10.34910/MCE.113.10.

239. *Bumanis, G.* Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete / G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs // Construction and building materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 274-281.

240. *Семейных, Н. С.* Оценка физико-механических свойств пористых заполнителей для легких бетонов / Н. С. Семейных, Г. В. Сопегин, А. В. Федосеев // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – №. 2 (113). – С. 203-212.

241. *Матвеева, О.И.* Легкий пористый заполнитель из модифицированной цеолитщелочной шихты / О. И. Матвеева, Н. К. Баишев, А. В. Фёдоров [и др.] // Строительные материалы. – 2023. – № 7. – С. 17-24. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-17-24

242. *Fedorov, A.V.* Peculiarities of production of light concretes with the use of granulated foamed aggregate on the basis of natural zeolite / A.V. Fedorov, V.A. Yadrikhinsky, A.L. Popov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2758. – 020006.

243. *Попов, М. Ю.* Легкий бетон на основе гранулированного пеностекла / М.Ю. Попов // Архитектура. Строительство. Образование: Научнотехнический и производственный журнал. – 2015. – №. 1. – С. 5.

244. *Güneyisi, E.* Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates / E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Ö. Pürsünlü [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2013. – No. 53. – P. 258-266.

245. *Литовкин, С. В.* Изучение золошлаковых отходов для их использования в качестве вторичных ресурсов / С.В. Литовкин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №. 9-1. – С. 23-27.

246. *Сулименко, Л. М.* Технология производства минеральных вяжущих материалов: Учебное пособие / Л. М. Сулименко, Т. Н. Акимова, А. А. Макаева. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 156 с.

247. *Туремуратов, Ш. Н.* Влияние минеральных микронаполнителей на процессы гидратационного структурообразования известково-белитовых вяжущих систем / Ш.Н. Туремуратов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан. - 2021. - №1(262). - С. 21-24.

248. *Шаяхметов, А. У.* Особенности термического разложения оксида, пероксида, гидроксида и карбоната кальция / А. У. Шаяхметов, А. Г. Мустафин, И. А. Массалимов // Вестник Башкирского университета. – 2011. – Т. 16. – №. 1. – С. 29-32.

249. *Слободчиков, Е. Г.* Исследование работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности в климатических условиях Севера / Е.Г. Слободчиков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2022. – №. 10. – С. 49-58.

250. *Баранова, А. А.* Природа пенообразователя и свойства цементной матрицы / А. А. Баранова, А. И. Савенков, П. А. Шустов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2016. – №. 3 (18). – С. 63-70.

251. *Вишторский, Е. М.* Оценка свойств некоторых пенообразователей для пенобетонов неавтоклавного твердения / Е.М. Вишторский // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – №. 4-2. – С. 121-126.

252. *Чернышева, Н. В.* Оценка свойств пенообразователей различной природы для неавтоклавных ячеистых бетонов / Н. В. Чернышева, С. В. Шаталова, В. С. Погорелов // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. – 2019. – С. 282-286.

253. *Кобзев, В. А.* Влияние природы пенообразователей на его свойства / В. А. Кобзев, А. В. Сумин, В. В. Нелюбова [и др.] // Образование, наука, производство, Белгород, 20–22 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 629-632.

254. *Лахтарина С. В.* Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Лахтарина Сергей Викторович. –Макеевка: ДонНАСА, 2016. –163 с

255. *Петров, В. П.* Технология и материаловедение пористых заполнителей и легких бетонов: Монография / В. П. Петров, Н. И. Макридин, Ю. А. Соколова, В. Н. Ярмаковский. – Москва: Палеотип | Российская академия архитектуры и строительных наук, 2013. – 332 с.

256. *Sergey, K.* Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer / K. Sergey, I. Dubov, K. Nazarov // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 121. – No. 5. – P. 12101-12101.

257. *Liu, H.* An explainable evaluation model for building thermal comfort in China / H. Liu, E. Ma // Buildings. – 2023. – Vol. 13. – No. 12. – С. 3107.

258. *Осипов, Ю. К.* Комфорт и безопасность жилой среды / Ю. К. Осипов, О. В. Матехина // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – №. 4 (10). – С. 43-47.

259. *Vuksanovic, D.* Optimization of microclimate in residential buildings / D. Vuksanovic, V. Murgul, N. Vatin [et al.] // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 680. – P. 459-466.

260. *Bezdenzhnukh, T.* Energy efficiency in civil engineering: analyzing world experience / T. Bezdenzhnukh, A. Kuritsyn, I. Gimelshtein // *MATEC Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 212. – P. 02009.

261. *Рафальская, Т. А.* Особенности совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения в условиях значительного снижения температур наружного воздуха / Т.А. Рафальская // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2010. – №. 11-12. – С. 62-72.

262. *Hosseini, S.* Improving climate resilience and thermal comfort in a complex building through enhanced flexibility of the energy system / S. Hosseini, P. Hajjaligol, M. Aghaei // *2022 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. – IEEE, 2022. – P. 1-6.

263. *Попов, А.Л.* Энергоэффективные решения в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий с применением легкобетонных изделий в условиях Якутии / А. Л. Попов, А. В. Фёдоров, Н. А. Григорьев // *Строительное материаловедение: настоящее и будущее: Сборник материалов III Всероссийской научной конференции, посвящённой девяностолетию кафедры Строительного материаловедения, НИУ МГСУ, 16 ноября 2023 года*. – М.: НИУ МГСУ, 2023. – С. 244-249.

264. *Фёдоров, А.В.* Моделирование удельных потерь теплоты шва кладки из легкого бетона на пористом заполнителе, в условиях низких температур / А. В. Фёдоров, А. Л. Попов // *Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (с международным участием), посвященной памяти первого Президента Республики (Саха) Якутия М.Е. Николаева: Материалы конференции, Якутск, 26–28 октября 2023 года*. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – С. 87-91.

265. *Рафальская, Т. А.* Теплоустойчивость наружных ограждений при нарушениях теплоснабжения / Т. А. Рафальская // *Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: Материалы IX Международной научно-*

практической конференции. В 2-х частях, Томск, 12–15 марта 2019 года / Под редакцией Т.Ю. Овсянниковой, И.Р. Салагор. Том Часть 2. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 733-739.

266. *Пастушков, П. П.* Исследования влияния различных факторов на теплопроводность крупноформатных керамических камней / П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, С. И. Смирнов // *Строительные материалы*. – 2023. – № 5. – С. 53-57. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-813-5-53-57.

267. *Лобачева, Д.М.* Исследования изменения теплопроводности газонаполненных теплоизоляционных материалов во времени / Д. М. Лобачева, П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, А. С. Кубенин // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. – 2024. – № 6(1078). – С. 43-45.

268. *Пастушков, П. П.* Исследования изменения коэффициента теплопроводности газонаполненных пористых теплоизоляционных материалов во времени / П. П. Пастушков, В. Г. Гагарин, Н. В. Павленко, Д. М. Лобачева // *Ломоносовские чтения - 2024: Секция механики: тезисы докладов*, Москва, 20 марта – 04 апреля 2024 года. – Москва: Издательство Московского университета, 2024. – С. 127-128.

269. *Кылатчанов А.П.* Вентиляционные процессы в зданиях / А.П. Кылатчанов // *Новосибирск: наука*. – Сиб. отд-е. – 1990. – 224 с.

270. *Габбасова, Р. И.* Численный метод решения нелинейных уравнений. Метод касательных / Р. И. Габбасова // *Аллея науки*. – 2018. – Т. 4, № 1(17). – С. 474-478.

271. *Чемодуров, В. Т.* Методы Ньютона / В. Т. Чемодуров, М. С. Сеитжелилов // *Численные методы в строительстве* / ФГАО ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Академия строительства и архитектуры. – Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2016. – С. 17-24.

272. *Богословский, В.Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

273. *Петров, Д. Ю.* Работа системы отопления и тепловой режим здания при отключении теплоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Петров Дмитрий Юрьевич. – Москва, 2013. – 20 с.

274. *Кононович, Ю.В.* Тепловой режим зданий массовой застройки / Ю. В. Кононович. — М.: Стройиздат, 1986. — 157 с.

275. *Соколов, Е. Я.* Теплофикация и тепловые сети: учебник / Е. Я. Соколов. — 9-е изд., стер. — Москва: МЭИ, 2009. — 472 с.

276. *Петров, А. А.* Легкий бетон на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием природного цеолита / А. А. Петров, А. Л. Попов, А. В. Федоров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 3. – С. 17-29. DOI 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29.

277. *Карпов, Д. Ф.* Исследование температуры внутреннего воздуха в помещении гражданского здания после аварийного отключения системы отопления / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, Е. В. Абрамова [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2024. – Т. 51. – №. 2. – С. 197-207.

278. Постановление Правительства РФ от 06.05.2011 N 354 (ред. от 07.03.2025) "О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов" // Собрание законодательства РФ. – 19.12.2025

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
 УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 «СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.К. АММОСОВА»

## СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

### СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и  
 инновационной деятельности  
 СВФУ имени М.К. Аммосова.

Е.Э. Соловьев

«18» апреля 2025 г.

### УТВЕРЖДАЮ:

Ректор  
 СВФУ имени М.К. Аммосова.  
 А.Н. Николаев

«18» апреля 2025 г.



## ЛЕГКИЙ БЕТОН НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА

Технические условия

СТО 02069705-83001-2025

### РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:  
 Канд. техн. наук, доцент

А.Л. Попов

«15» апреля 2025 г.

### Исполнители:

аспирант

А.В. Фёдоров

«15» апреля 2025 г.

Якутск 2025 г.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
М.К. АММОСОВА»**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
СФУ имени М.К. Аммосова  
Е.Э. Соловьев  
\_\_\_\_\_ 2025 г.



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ**

на производство стеновых блоков из конструкционно-теплоизоляционного  
легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита

**СОГЛАСОВАНО**

Генеральный директор  
ООО «Сунтарцеолит»

П.М. Попов  
\_\_\_\_\_ 2025 г.



**РАЗРАБОТАНО**

Научный руководитель:

Канд. техн. наук, доцент

А.Л. Попов  
\_\_\_\_\_ 2025 г.

Аспирант кафедры ПМиСМ

А.В. Фёдоров  
\_\_\_\_\_ 2025 г.

Якутск 2025 г.



**сунтарцеолит**  
 ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «СУНТАРЦЕОЛИТ»  
 РЕСПУБЛИКА САХА (ЯКУТИЯ), СУНТАРСКИЙ УЛУС, с. СУНТАР  
 678290, РС(Я), Сунтарский улус, с. Сунтар, ул. Виллофская, 1 б.  
 ОГРН 1021400835763 ОКПО 23297907 ИНН 1424000895 КПП 142401001  
 E-mail: sunzeolit26@mail.ru Тел: 8(41135) 21-7-53/22-1-42

**УТВЕРЖДАЮ:**

Генеральный директор  
 ООО «Сунтарцеолит»  
 П.М. Попов  
 «25» августа 2025 г.

**АКТ**

**выпуска опытно-промышленной партии блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита**

с. Устье

«25» августа 2025 г.

Комиссия в составе: **представители от ООО «Сунтарцеолит»**  
 генеральный директор П.М. Попов  
**представители от СВФУ имени М.К. Аммосова**  
 канд. техн. наук, доцент А.Л. Попов  
 аспирант А.В. Фёдоров

участвовала в выпуске опытной партии блоков из конструкционно-теплоизоляционного легкого бетона на пористом заполнителе с применением природного цеолита на действующей линии.

Выпущенная партия использована для возведения подсобных помещений на территории предприятия в с. Устье.

**Представители от ООО «Сунтарцеолит»**

Генеральный директор

П.М. Попов

**Представители от СВФУ имени М.К. Аммосова**

Канд. техн. наук, доцент

А.Л. Попов

Аспирант кафедры ПМиСМ

А.В. Фёдоров

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебно-методической  
работе СВФУ

А.И. Голиков

«24» сентября 2025 г.

## СПРАВКА

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы  
в учебный процесс**

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и опытно-промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы А.В. Фёдорова «Легкий бетон на композиционном вяжущем с применением природного цеолита», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 Строительство, профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций»; магистров по направлению 08.04.01 Строительство, профиль «Строительные материалы и технологии в условиях криолитозоны», что отражено в рабочих программах дисциплин «Вяжущие вещества», «Технология бетона, строительных изделий и конструкций» и «Проблемы строительного материаловедения».

Зав. кафедрой «Прикладная механика  
и строительное материаловедение»,  
к.т.н., доцент

А.Л. Попов

Председатель учебно-методической комиссии  
Инженерно-технического института,  
к.т.н., доцент

С.Г. Анзупова