

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



РЯБЧЕВСКИЙ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЕНОБЕТОНЫ
НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

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

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сулейманова Людмила Александровна**

Белгород 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	13
1.1. Современное состояние производства и применения сухих строительных смесей.....	14
1.2. Технологии получения неавтоклавного ячеистого бетона.....	25
1.3. Повышение эффективности пенобетонов на основе сухих смесей	33
1.4. Методы контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов.....	45
1.4.1. Методы определения пористости ячеистых бетонов.....	45
1.4.2. Типы изображений и способы их получения	51
1.5. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистых бетонов....	57
1.6. Выводы	60
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	63
2.1. Характеристика применяемых материалов	63
2.2. Методы исследований	70
2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов.....	70
2.2.2. Методы исследования физико-механических характеристик теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	75
2.2.3. Методы исследования макропористой структуры теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	79
2.3. Выводы	83
3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ СУХИХ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	85
3.1. Оценка эффективности пенообразователей различной природы	85
3.2. Влияние модификаторов на кратность и стабильность пен	89
3.3. Подбор минеральных добавок	92

3.4.	Влияние режимов механоактивации сырьевых компонентов на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора	95
3.5.	Структурообразование и свойства цементного камня.....	104
3.6.	Выводы	110
4.	СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ.....	112
4.1.	Проектирование рецептурно-технологических факторов производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	112
4.2.	Свойства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей и рекомендации по их применению	129
4.3.	Исследование микроструктуры теплоизоляционных пенобетонов ...	132
4.4.	Разработка системы контроля и оценки качества макропористой структуры ячеистых бетонов	135
4.4.1.	Оптимизация метода анализа изображений для оценки пористой структуры ячеистых бетонов.....	135
4.4.2.	Исследование параметров поверхностной пористости теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	141
4.5.	Исследование фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов.....	146
4.5.1.	Фрактальная размерность дискретной топологии пористой структуры ячеистых бетонов	146
4.5.2.	Фрактальная размерность кубической структуры ячеистых бетонов.....	154
4.5.3.	Фрактальная размерность пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	159
4.6.	Выводы	165
5.	ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ И ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	167

5.1. Совершенствование технологической схемы производства сухих смесей и теплоизоляционных пенобетонов на их основе.....	167
5.2. Технико-экономическое обоснование эффективности производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей	174
5.3. Внедрение и апробация результатов исследования	180
5.4. Выводы	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	186
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	209
Приложение А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660735	210
Приложение Б. Патент на изобретение № 2811671	211
Приложение В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667396	212
Приложение Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667454	213
Приложение Д. Титульный лист стандарта организации «Сухие пенобетонные смеси. Технические условия».....	214
Приложение Е. Титульный лист рекомендаций по производству сухих пенобетонных смесей	215
Приложение Ж. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»	216
Приложение И. Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	217

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В условиях глобального курса на снижение энерго- и ресурсопотребления в строительстве возрастает спрос на материалы, сочетающие экологичность, низкую плотность и высокие теплоизоляционные свойства, особенно для северных регионов. К таким перспективным материалам относятся пенобетоны марок по средней плотности $D300$ и ниже. Применение теплоизоляционных пенобетонов, обладающих значительным потенциалом для сокращения материало- и энергозатрат на всех этапах жизненного цикла зданий, а также сухих смесей для их производства, сдерживается необходимостью поиска баланса между ключевыми показателями качества: низкой плотностью и теплопроводностью, высокой прочностью.

Повышение эффективности теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей обеспечивается за счет применения минеральных добавок, таких как микрокремнезем и вспученный перлитовый песок. Исследование данных технологических подходов соответствует приоритетам «зеленого» строительства и государственных программ по энергосбережению, направленных на создание экологичных зданий. При этом ключевым фактором достижения этих целей становится развитие систем контроля и оценки качества макропористой структуры теплоизоляционных материалов для создания новых поколений пенобетонов, отвечающих требованиям современных строительных стандартов.

Работа выполнена в рамках: Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года, НИР А54/20; Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова «Приоритет 2030» на 2021-2030 гг., №Пр-10/22; при финансовой поддержке в форме гранта Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК» проект № 17343ГУ/2022; с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы. Основной объем исследований, касающихся разработки теплоизоляционных пенобетонов, затрагивает вопросы регулирования показателей их качества посредством модификации составов за

счет введения минеральных, пластифицирующих и пенообразующих добавок. Однако, мало изученными, но актуальными в настоящее время, являются: особенности перевода жидких пенообразователей в сухое состояние гидратационным методом с последующей их стабилизацией для получения сухих пенобетонных смесей; изучение влияния минеральных добавок и режимов механоактивации сырьевых компонентов на физико-механические характеристики теплоизоляционных пенобетонов; системы контроля и оценки качества их макропористой структуры, включая применение фрактального анализа.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение эффективных теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей с улучшенными физико-механическими характеристиками и системы контроля и оценки качества их макропористой структуры.

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

- изучение свойств сухих стабилизированных пенообразователей и минеральных добавок (микрокремнезем, вспученный перлитовый песок) как компонентов сухих пенобетонных смесей;
- оценка влияния режимов механоактивации сырьевых компонентов на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора;
- разработка составов теплоизоляционных пенобетонов с учетом рецептурно-технологических факторов и изучение их физико-механических характеристик;
- развитие методов контроля и анализа макроструктуры теплоизоляционных пенобетонов, включая количественную оценку параметров пористости;
- оценка качества иерархической организации пор теплоизоляционных пенобетонов методом фрактального анализа и исследование взаимосвязи топологии структуры с фрактальной размерностью;
- подготовка нормативной документации на производство и применение сухих смесей и теплоизоляционных пенобетонов на их основе; апробация

результатов исследований в производственных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей за счет рационального подбора сырьевых компонентов (цемента, минеральных добавок – микрокремнезема и вспученного перлитового песка), их предварительную механоактивации для достижения удельной поверхности $700\text{--}850\text{ м}^2/\text{кг}$, перевода жидкого пенообразователя в сухое состояние гидратационным методом, применения бентонитовой глины в качестве стабилизатора пены, а также формирования однородной пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов с полидисперсным распределением пор при создании полифазной системы композиции вяжущего и стабилизированного пенообразующего компонента, что обеспечивает низкую среднюю плотность ($202\text{--}296\text{ кг/м}^3$) и теплопроводность ($0,06\text{--}0,07\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) материала при достаточной прочности на сжатие ($0,50\text{--}1,17\text{ МПа}$).

Установлены закономерности влияния минеральных добавок на микроструктуру цементного камня: перлит формирует механически закрепленную систему за счет проникновения гидратных новообразований в его поры, исключая дефекты расслоения; микрокремнезем индуцирует образование низкоосновного C-S-H геля повышенной плотности, снижая содержание портландита. Совместное использование микрокремнезема и вспученного перлитового песка в цементной матрице создает полифазную систему (этtringит, C-S-H гель), что повышает прочность цементного камня.

Развита система контроля и оценки качества макропористой структуры теплоизоляционных пенобетонов, в том числе с использованием методов фрактального анализа, основанная на применении аморфного углерода в качестве контрастного агента для заполнения пор, включающий бинаризацию цифровых изображений поверхности материала, где поры, заполненные углеродом, идентифицируются по интенсивности пикселей при определении параметров

пористости материала. Выявлена функциональная взаимосвязь между распределением пор по размерам, их морфологией, пространственной организацией и фрактальной размерностью, позволяющие количественно оценивать степень лакуарности пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей с применением минеральных добавок и стабилизированных пенообразующих компонентов.

Дополнены теоретические представления о применении методов фрактального анализа для оценки качества пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов, а также о корреляции фрактальной размерности со степенью лакуарности систем моно- и гетеродисперсной упаковки пор.

Предложены режимы механоактивации сырьевых компонентов сухих смесей, направленные на повышение реакционной способности сырья и однородности структуры. По совокупности факторов проведено ранжирование помольных агрегатов по степени повышения эффективности их использования: вибрационная мельница → вихревая струйная мельница → роторно-шаровая мельница. Экспериментально подтверждено, что применение роторно-шаровой мельницы обеспечивает достижение удельной поверхности сырьевых компонентов теплоизоляционных пенобетонов 700–850 м²/кг при минимальной продолжительности помола.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения 10% микрокремнезема и 5% вспученного перлитового песка в качестве минеральной добавки для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности *D*300; 5% микрокремнезема и 10% вспученного перлитового песка в качестве минеральных добавок для теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности *D*200 и *D*250,

рекомендуемых для утепления стен с несущим каркасом, чердачных перекрытий, полов по лагам, плоских кровель и мансард.

Предложены технологическая схема производства сухих пенобетонных смесей, основанная на совместном помоле компонентов в роторно-шаровой мельнице, и технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе разработанных сухих смесей, особенностью которой является затворение сухой смеси водой без использования пеногенератора, что упрощает процесс заливки пенобетона в производственных условиях.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служат результаты фундаментальных и прикладных исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными в области получения теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей. Экспериментальная часть включала анализ сухих смесей и пенобетонов на их основе с применением рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии и стандартизированных испытаний образцов. Структурные характеристики теплоизоляционных пенобетонов оценивались методами компьютерной обработки изображений, включая расчет фрактальной размерности пор для оценки качества макроструктуры материала. Все исследования выполнены на современном оборудовании с обеспечением статистической достоверности результатов.

Положения, выносимые на защиту:

– научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение теплоизоляционных пенобетонов за счет рационального подбора механоактивированных сырьевых компонентов сухих смесей;

– обоснование эффективности перевода жидких пенообразователей в сухое состояние гидратационным методом с последующей стабилизацией пены бентонитовой глиной;

- принципы рационального подбора сырьевых компонентов сухих пенобетонных смесей с учетом их механоактивации;
- закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики теплоизоляционных пенобетонов;
- алгоритм определения пористости теплоизоляционных пенобетонов на основе заполнения пор аморфным углеродом и анализа изображений с оценкой его эффективности и его реализация;
- оценка качества иерархической организации пор теплоизоляционных пенобетонов методом фрактального анализа и исследование взаимосвязи топологии структуры с фрактальной размерностью;
- технологические решения производства сухих пенобетонных смесей и теплоизоляционных пенобетонов на их основе с оценкой технико-экономической эффективности. Результаты апробации.

Степень достоверности результатов обеспечена: выполнением широкого комплекса экспериментальных исследований с применением различных методов и современного высокотехнологичного сертифицированного оборудования с учетом требований нормативной документации российских стандартов; производственными испытаниями и их положительными практическими результатами; соответствием полученных результатов общепринятым фактам и работам других авторов.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы исследований докладывались и обсуждались: на V, VIII Международных студенческих строительных форумах (Белгород, 2020, 2023), V, VIII Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2021, 2024), Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2023), Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения)» (Белгород, 2023), IX Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на

Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024), национальной конференции «Актуальные вопросы техники, науки, технологии» (Брянск, 2024), XXII Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Саранск, 2024), VIII Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2024).

Внедрение результатов исследования. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород), где была выпущена партия сухих пенобетонных смесей.

Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Лесная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству сухих пенобетонных смесей.

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-077-2024 «Сухие пенобетонные смеси» и Рекомендации по производству сухих пенобетонных смесей.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Публикации. Основные положения работы изложены в 20 публикациях, в том числе: 2 статьи в российском журнале, входящем в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ (К1). Получен 1 патент на изобретение и 3 Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение эффективных теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих

смесей с улучшенными физико-механическими характеристиками с последующей оценкой качества их макропористой структуры. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 217 страницах машинописного текста, включающего 38 таблиц, 58 рисунков, список литературы из 208 источников, 8 приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Актуальность интеграции ячеистобетонных материалов и других инновационных сухих строительных смесей (ССС) обусловлена насущной необходимостью оптимизации использования энергетических ресурсов в условиях их ограниченности. Изменение климатических условий и прогнозируемое истощение традиционных источников энергии делают все более важным рациональное использование энергии и снижение потребления топлива, что существенно влияет на темпы и качество социально-экономического развития [1-4]. В контексте глобальных тенденций все большее внимание уделяется стратегиям энергосбережения, повышению эффективности тепловой защиты зданий и промышленных объектов, а также внедрению технологий и материалов с низким энергопотреблением [5-9].

Ячеистобетонные материалы на основе сухих строительных смесей обладают значительным потенциалом для повышения энергетической эффективности и эксплуатационных характеристик зданий. Благодаря низкой теплопроводности и повышенным прочностным показателям, эти материалы могут существенно снизить энергетические затраты на отопление и охлаждение, что способствует сокращению выбросов парниковых газов и минимизации воздействия на окружающую среду [10-12]. Именно поэтому они становятся важнейшим компонентом устойчивого развития строительной отрасли, особенно в контексте широкого внедрения инновационных технологий и методов повышения качественных свойств строительных материалов.

Эта тенденция соответствует принципам «зеленого» строительства, направленного на минимизацию воздействия на окружающую среду и обеспечение экологической безопасности зданий [13-16]. Использование ячеистобетонных материалов и сухих строительных смесей позволяет не только оптимизировать энергетические затраты, но и стимулировать развитие более устойчивой и ресурсоэффективной инфраструктуры.

1.1. Современное состояние производства и применения сухих строительных смесей

В настоящее время строительная отрасль переживает значительные изменения, обусловленные усиливающейся необходимостью повышения энергетической эффективности и снижения воздействия на окружающую среду. В этом контексте сухие строительные смеси выделяются как один из наиболее перспективных материалов, способных удовлетворить эти требования. Благодаря своей универсальности и широким возможностям применения, сухие смеси находят все большее использование в различных строительных проектах, от жилых зданий до промышленных объектов [17-19].

Производство сухих строительных смесей характеризуется постоянным совершенствованием технологий, направленных на улучшение их эксплуатационных характеристик и снижение энергетических затрат. Современные сухие смеси разрабатываются с учетом требований устойчивого развития и экологической безопасности, что делает их ключевым компонентом инновационных строительных решений [20, 21].

Сухие строительные смеси нашли широкое применение в различных областях современного строительства благодаря их универсальным характеристикам и разнообразию функциональных назначений.

Сухая строительная смесь представляет собой композицию из сухих компонентов, тщательно дозированных и смешанных на заводе, и затворяемых водой перед их применением. Основными составляющими данных смесей являются вяжущее (которое может быть минеральным, полимерным или смешанным), заполнители и специальные добавки. Минеральное вяжущее, как правило, включает в себя цемент или известь, выступая в качестве основы для образования структуры после затвердевания смеси. Полимерное вяжущее используется для создания специальных свойств смеси, таких как повышенная гибкость или устойчивость к коррозии.

Заполнители, которые также являются частью смеси, применяются для увеличения объема и снижения стоимости материала. В качестве заполнителей могут использоваться песок, гипс или другие минеральные породы. Добавки, в свою очередь, играют решающую роль в улучшении свойств смеси, таких как пластичность, водоустойчивость или скорость затвердевания.

Согласно [22-26], сухие строительные смеси классифицируются по условиям применения, наибольшей крупности зерен заполнителя, виду вяжущего, функциональному назначению и способу нанесения, что показано на рисунке 1.1.

Отдельными нормативными документами регламентируются смеси сухие строительные на цементном вяжущем (ГОСТ 31357-2007, ГОСТ Р 58277-2018), на гипсовом вяжущем (ГОСТ Р 58276-2018), шпатлевочные (на цементном вяжущем (ГОСТ 33699-2015), на гипсовом вяжущем (ГОСТ Р 58278-2018)), штукатурные (на цементном вяжущем (ГОСТ 33083-2014, ГОСТ Р 56686-2015), на гипсовом вяжущем (ГОСТ Р 58279-2018, с 01.09.2025 – ГОСТ Р 58279-2024)), напольные (ГОСТ 31358-2019), затирочные (ГОСТ Р 58271-2018), клеевые (на цементном вяжущем (ГОСТ 56387-2018), на гипсовом вяжущем (ГОСТ Р 58275-2018; с 01.09.2025 – ГОСТ Р 58275-2024)), гидроизоляционные проникающие (на цементном вяжущем (ГОСТ 34669-2020)), гидроизоляционные для герметизации статичных швов (трещин в строительных конструкциях (на цементном вяжущем (ГОСТ 34885-2022)), ССС для устранения напорных течей в строительных конструкциях на цементном вяжущем (ГОСТ 34804-2021), кладочные (ГОСТ Р 58272-2018), ССС для кладочных растворов на цементном вяжущем с использованием керамзитового песка (ГОСТ 57796-2017), а также заполнители и наполнители из плотных горных пород для производства сухих строительных смесей (ГОСТ 32021-2012).

История сухих строительных смесей насчитывает несколько десятилетий и тесно связана с развитием строительной отрасли и технологиями, направленными на оптимизацию строительных процессов. Первые прототипы сухих строительных смесей начали формироваться в начале XX в., когда строители

начали экспериментировать с предварительным смешиванием различных компонентов, таких как цемент, песок и известь.

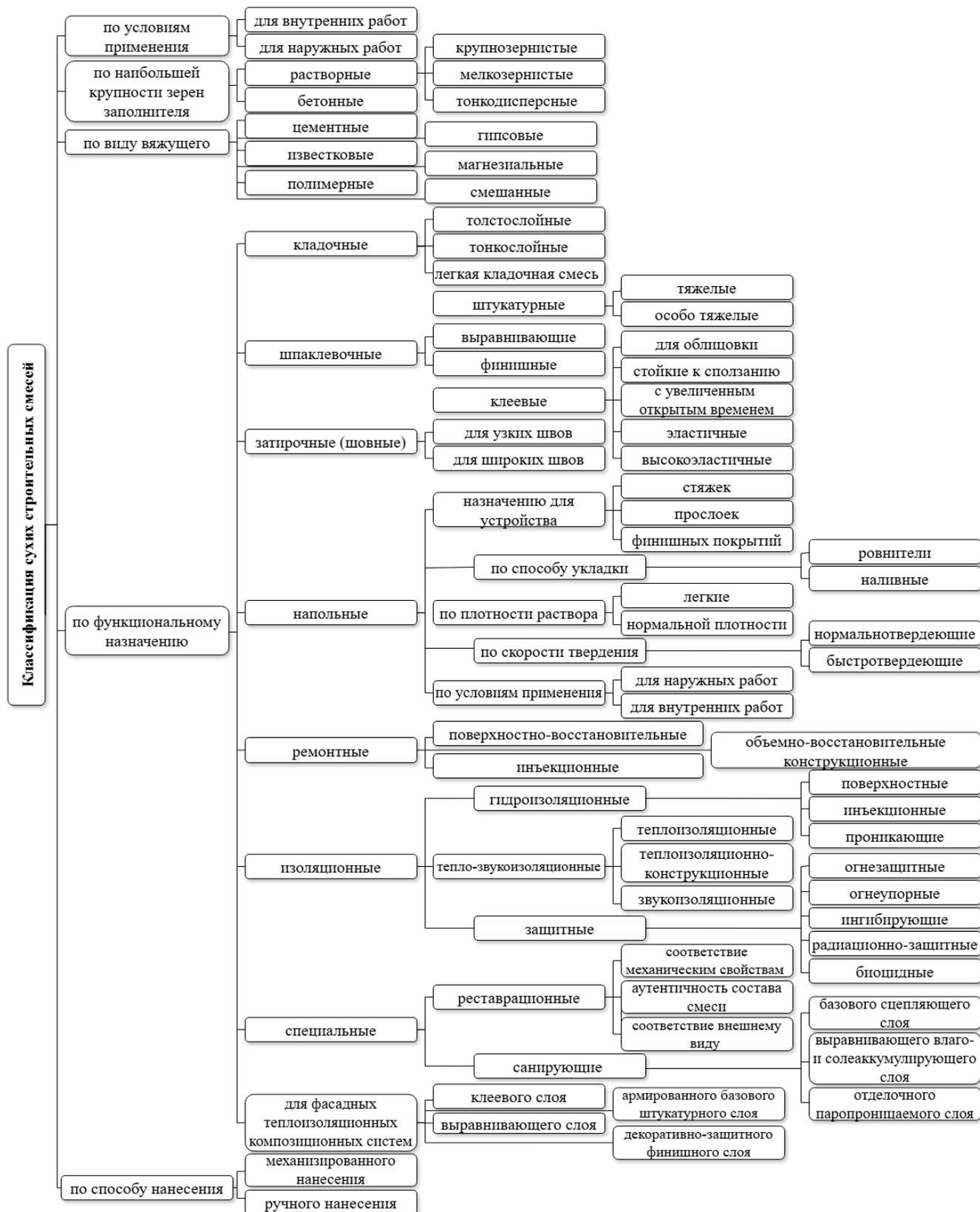


Рисунок 1.1 – Классификация сухих строительных смесей

Однако массовое производство сухих строительных смесей началось в середине XX в. В 1950-х и 1960-х гг. в странах Европы и Северной Америки началось становление крупных производств, которые стали предлагать широкий ассортимент сухих смесей для различных строительных целей. В это время были разработаны промышленные методы дозирования и смешивания компонентов в строгих пропорциях, что обеспечивало стабильность и высокое качество продукта. Эти методы позволили значительно сократить время строительных работ и улучшить их качество [27].

С течением времени технологии производства сухих строительных смесей эволюционировали и адаптировались под современные требования. В 1970-х гг. внедрение полимерных модификаторов в состав смесей стало значительным шагом вперед. Эти добавки повышали прочность, эластичность и адгезию смесей к различным поверхностям, что сделало их более универсальными для применения в строительстве. Также в это время появились специализированные смеси для выполнения конкретных видов работ, таких как отделка стен, создание полов и ремонтные смеси. Это обеспечивало возможность выбора наиболее подходящей смеси в зависимости от условий эксплуатации и специфики строительного проекта.

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к устойчивому строительству и минимизации экологического воздействия. Это повлияло на развитие новых рецептур сухих строительных смесей, например, с использованием переработанных материалов или добавок на основе природных компонентов. Эти изменения способствовали снижению потребления ресурсов и энергии в процессе производства, а также уменьшению выбросов CO₂ в атмосферу.

Рынок сухих строительных смесей является важной составляющей современной строительной индустрии как в России, так и в мире, демонстрируя устойчивый рост, обусловленный увеличением объемов строительства, ремонта и реконструкции зданий, а также стремлением к применению более эффективных и

технологичных материалов. Мировой рынок сухих строительных смесей характеризуется высокой степенью конкуренции и наличием множества крупных игроков, где основными движущими силами являются общий объем строительных работ в различных регионах, инновационные разработки в области материалов, строгие экологические требования и географические особенности. Ключевые регионы мирового рынка включают Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР), Северную Америку, Европу и Латинскую Америку, при этом АТР выступает в качестве крупнейшего и наиболее динамично развивающегося рынка благодаря интенсивному строительству в Китае, Индии и других странах региона (рисунок 1.2). Северная Америка и Европа также поддерживают стабильный спрос за счет ремонтных работ, реконструкции жилого фонда и инфраструктурных проектов.

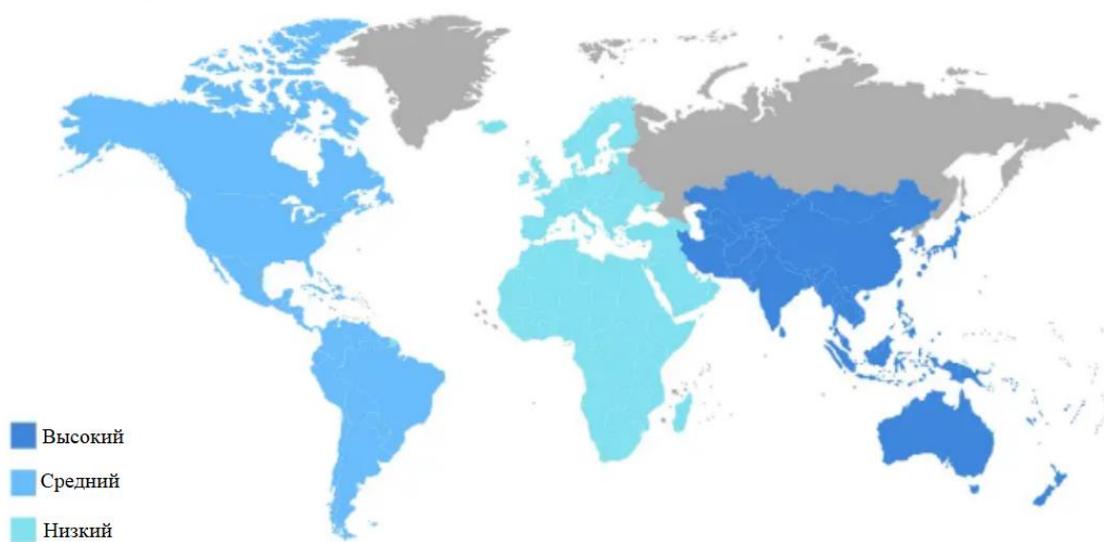


Рисунок 1.2 – Прогнозируемые темпы роста мирового рынка ССС в разбивке по регионам в период до 2030 г.

Российский рынок сухих строительных смесей имеет свои особенности, включая рост строительства, политику импортозамещения, региональную специфику и сезонность. Увеличение объемов жилищного строительства, инфраструктурных проектов и коммерческой недвижимости стимулирует развитие рынка, а политика импортозамещения направлена на увеличение доли отечественных производителей за счет государственной поддержки и внедрения

собственных технологий. Региональная дифференциация и сезонность строительных работ оказывают существенное влияние на структуру спроса, при этом наибольший спрос приходится на летние месяцы.

Анализ производства строительных смесей в России демонстрирует устойчивую динамику роста, которая наблюдалась в последние годы. В 2023 г. объем производства строительных смесей в стране достиг 15 847 тыс. т., что подчеркивает значимость данного сектора для строительной отрасли. Согласно оперативным данным, в период с января по октябрь 2024 г. было произведено 13 839 тыс. т. строительных смесей, что на 0,5 % превышает аналогичный показатель за тот же период предыдущего года. В частности, в октябре 2024 г. объем производства составил 1400 тыс. т., что на 2,4% больше по сравнению с октябрём 2023 г. Эти данные свидетельствуют о сохранении положительной динамики производства строительных смесей, несмотря на возможные колебания в отдельных периодах [28].

Анализ данных за период с 2018 по 2023 гг. показывает, что среднегодовой темп роста производства строительных смесей в России составил 11,58% (рисунок 1.3). Это указывает на значительный потенциал роста данного рынка и на его важную роль в обеспечении строительных потребностей страны. С учетом динамики производства в январе-октябре 2024 г., эксперты оценивают общий объем производства в 2024 г. на уровне 15 931 тыс. т. [28-31]. Прогнозируется, что данная тенденция сохранится в будущем, и рынок продолжит расти с учетом установившихся темпов изменения.

Для оценки будущих объемов производства используется метод логарифмической регрессии, который позволяет сгладить колебания и выявить общие тенденции на рынке. Согласно прогнозам, к 2028 г. объем производства строительных смесей в России достигнет не менее 17 469 тыс. т. [28, 32]. Этот прогноз отражает уверенность в дальнейшем развитии строительной отрасли и в увеличении спроса на качественные строительные материалы.

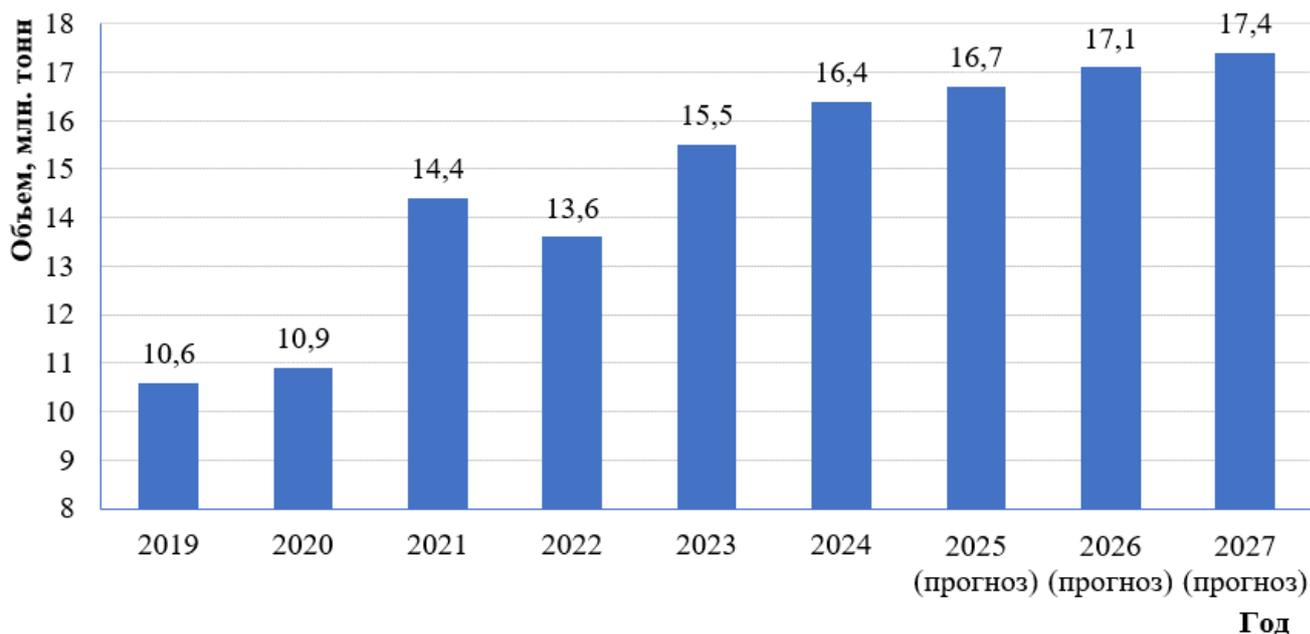


Рисунок 1.3 – Динамика внутреннего производства строительных смесей в России в натуральном выражении в период с 2019 по 2027 годы

С точки зрения географического распределения производства строительных смесей лидирующую позицию занимает Центральный федеральный округ, на долю которого приходится 33,3% от общего объема производства в России (рисунок 1.4). Далее следуют Приволжский и Южный федеральные округа с долями 17,1 и 12,5% соответственно. Такая концентрация производства в определенных регионах связана с наличием развитой инфраструктуры, близостью к рынкам сбыта и другими факторами, влияющими на экономическую целесообразность производства. Данные о географическом распределении производства также важны для планирования логистических цепочек и оптимизации поставок строительных смесей в различные регионы страны [28].

Основными сегментами российского рынка сухих строительных смесей являются клей для плитки, штукатурные смеси, шпатлевки, смеси для устройства полов и специальные смеси, такие как гидроизоляционные и теплоизоляционные составы. На рынке представлены как международные компании, так и местные производители, такие как Knauf, Saint-Gobain, Ceresit, Bergauf, что создает высокую конкуренцию, стимулирующую улучшение качества продукции, расширение ассортимента и оптимизацию цен (рисунок 1.5).

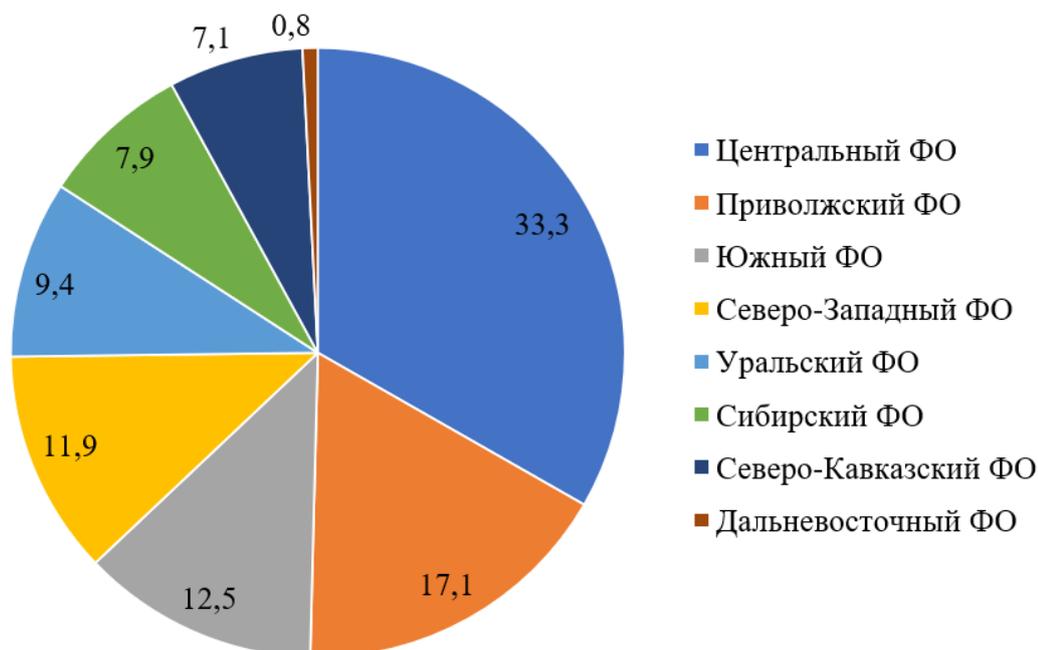


Рисунок 1.4 – Структура производства строительных смесей по федеральным округам в период январь-октябрь 2024 г.

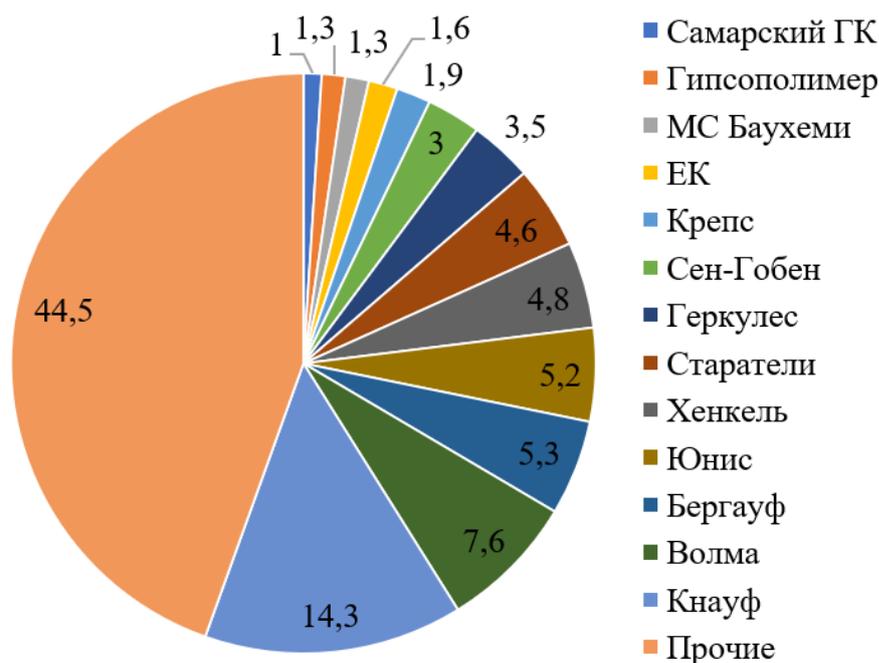


Рисунок 1.5 – Доля рынка ССС в России в 2024 г.

В перспективе ожидается, что мировой и российский рынки сухих строительных смесей продолжат расти, поддерживаемые увеличением объемов строительства в развивающихся странах, развитием инновационных технологий и материалов, повышением требований к энергоэффективности и экологичности зданий, а также государственной поддержкой строительной отрасли и стимулированием импортозамещения. Таким образом, рынок сухих строительных

смесей представляет собой перспективное направление для инвестиций и развития бизнеса, требующее непрерывного внимания к инновациям, потребностям потребителей и изменениям в нормативной базе.

В зависимости от роста спроса на теплоизоляционный ячеистый бетон доля ячеистого бетона низких марок по средней плотности $D200-D400$ в общем объеме постепенно увеличивается. Изменение усредненного значения средней плотности выпущенной ячеистобетонной продукции представлено на рисунке 1.6.

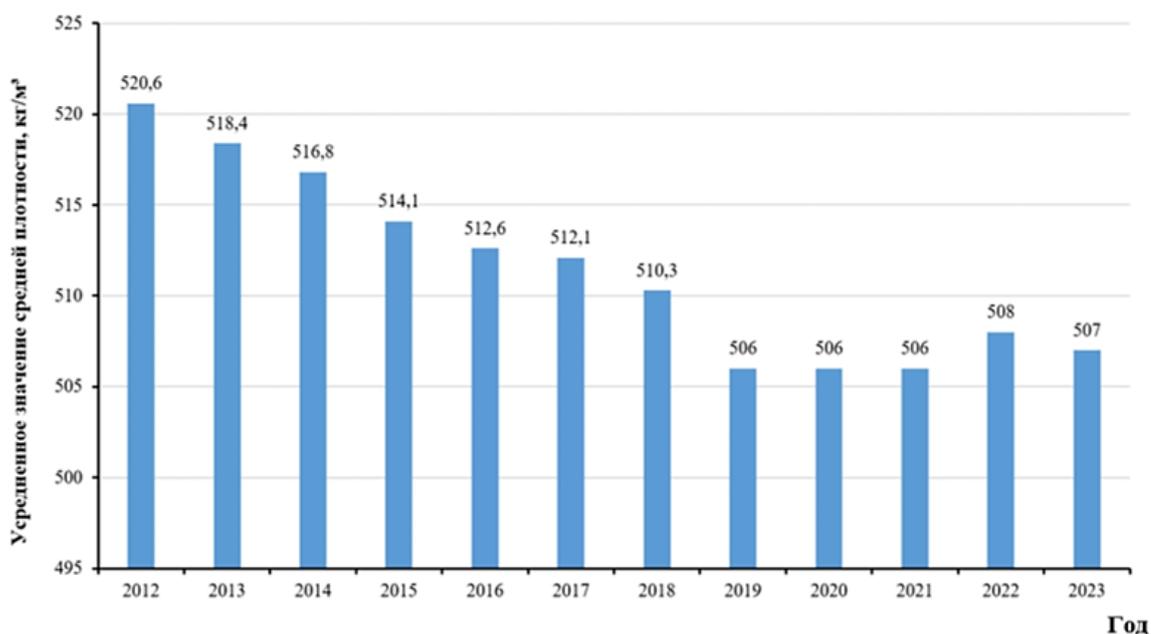


Рисунок 1.6 – Изменение усредненного значения средней плотности выпущенной ячеистобетонной продукции

Три основные марки по средней плотности $D400$, $D500$, $D600$ занимают 98,8 % от всего объема произведенного ячеистого бетона. На долю остальных марок приходится лишь 1,2 %.

Мировой рынок ССС представляет собой сектор с выраженной динамикой, в 2024 г. его объем оценивается в 5,3 млрд м³ и прогнозируется, что к 2030 г. он достигнет 7,13 млрд м³, демонстрируя среднегодовой темп роста в размере 5,04% (рисунок 1.7). Этот существенный рост обусловлен стремительной урбанизацией и активной модернизацией инфраструктуры по всему миру, где лидирующие экономики реализуют масштабные строительные проекты, направленные на удовлетворение растущих потребностей городского населения. Ожидается, что в 2025 г. общая площадь новых коммерческих этажей в глобальном масштабе

достигнет 634,5 млн м² [33, 34]. Эта тенденция подчеркивает переход к реализации более масштабных и сложных строительных проектов, требующих значительных объемов готовых ССС.

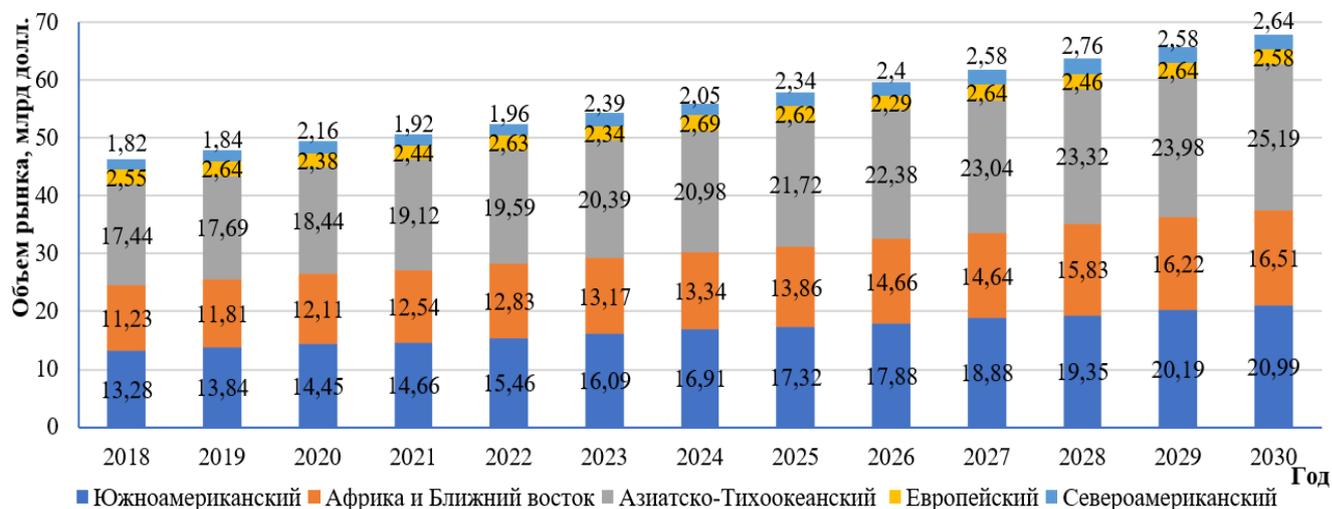


Рисунок 1.7 – Мировое производство сухих строительных смесей по регионам в период с 2018 по 2030 гг.

Устойчивые методы строительства играют все более важную роль на рынке сухих строительных смесей. Производители активно инвестируют в исследования и разработки для создания экологически чистых составов, которые сохраняют структурную целостность, минимизируя при этом воздействие на окружающую среду. Эта тенденция отражается в растущем интересе к сухим смесям, содержащим переработанные материалы, добавки на биологической основе и составы с низким выбросом углерода. Примером может служить Индия, которая планирует построить 60 торговых центров, используя устойчивые методы строительства, что означает спрос на экологически чистые сухие строительные смеси [34].

Правительственные инициативы и государственно-частное партнерство также оказывают значительное влияние на рынок сухих строительных смесей. Такие заявления, как план Германии по строительству новых жилых единиц к 2024 г., стимулируют строительную деятельность, что приводит к повышенному спросу на высококачественные сухие смеси. Кроме того, технологические достижения в области производства и нанесения сухих строительных смесей,

такие как автоматизированные смесительные заводы и улучшенные методы контроля качества, повышают эффективность и последовательность проектов.

Сектор коммерческой недвижимости является ключевым двигателем инноваций на рынке сухих строительных смесей. Амбициозные планы Саудовской Аравии по расширению коммерческих площадей демонстрируют масштабную строительную деятельность, для которой требуются специализированные сухие смеси с улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими как быстрая схватываемость, повышенная прочность и превосходная эстетика. Ожидается, что мировой объем офисных площадей класса А в Индии значительно расширится к 2026 и 2030 гг., что указывает на необходимость высококачественных сухих строительных смесей для выполнения проектов в соответствии со строгими спецификациями [34].

Жилой сектор остается важной частью рынка сухих строительных смесей, на которую приходится значительная доля общего спроса. Колебания в глобальной площади новых жилых помещений, вызванные такими факторами, как нехватка земли, рабочей силы и высокие цены на строительные материалы, подчеркивают сложность этой области. Тем не менее, государственные инвестиции в схемы доступного жилья, такие как Minha Casa Minha Vida в Бразилии и FOGAES в Чили, призваны стимулировать жилищное строительство и, следовательно, потребление сухих строительных смесей. Инфраструктурный сектор также играет важную роль в поддержании спроса на сухие строительные смеси, особенно в рамках проектов, финансируемых за счет государственно-частного партнерства, которые охватывают строительство дорог, мостов и других жизненно важных объектов инфраструктуры [34].

Общее состояние мирового рынка сухих строительных смесей определяется взаимосвязанным влиянием урбанизации, стремлением к устойчивым строительным практикам, государственными инициативами и динамикой различных секторов конечного использования. По мере развития строительной отрасли рынок сухих строительных смесей будет адаптироваться, предлагая

инновационные решения, отвечающие меняющимся потребностям строительных специалистов и обеспечивающие устойчивое, эффективное и высококачественное строительство.

Перспективным направлением развития рынка ССС является расширение ассортимента специализированных продуктов, предназначенных для выполнения конкретных видов строительных работ, таких как отделка стен, устройство напольных покрытий, гидроизоляция, теплоизоляция и др. Данный подход позволяет более эффективно решать задачи, возникающие в процессе строительства, и обеспечивает достижение высокого качества конечного результата, что является приоритетной задачей для строительных организаций.

Особую актуальность приобретает разработка и внедрение поризованных строительных материалов на основе ССС, в частности, ячеистых бетонов, в контексте возрастающих требований к энергоэффективности зданий и сооружений. Уникальные свойства этих материалов, включающие низкую плотность, высокую теплоизоляционную способность и улучшенные звукоизоляционные характеристики, делают их перспективными для применения в качестве стеновых конструкций, теплоизоляционных слоев и других конструктивных элементов, способствующих снижению энергопотребления и повышению комфорта в зданиях.

1.2. Технологии получения неавтоклавного ячеистого бетона

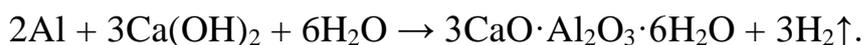
Оптимальное распределение размеров и замкнутость пор в смеси улучшает показатели теплопроводности, звукоизоляции и расхода материалов. Для наибольшего эффекта необходимо стремиться к получению минимальных размеров пор [35]. Снижения размера пор достигают регулированием процессов поризации, введением минеральных и (или) органических добавок, повышением дисперсности твердых составляющих.

Существуют следующие способы порообразования бетона:

– газообразование: химические вещества, образующие газ, смешиваются с известью или цементным раствором в жидкой или пластичной стадии, что

приводит к увеличению объема массы и, когда газ выходит, оставляет пористую структуру. На эффективность газообразователя влияет щелочность цемента, а также меры, принимаемые для предотвращения утечки газа до затвердевания раствора. В случае портландцемента с низкой щелочностью добавление гидроксида натрия или извести дополняет необходимую щелочь.

Метод газообразования является наиболее распространенной техникой поризации. Этот процесс основан на химической реакции между газообразователем, таким как алюминиевая пудра, и щелочной средой, создаваемой гидроксидом кальция, который образуется в процессе гидратации цемента. В результате реакции выделяется газ (водород), который формирует пузырьки в объеме бетонной смеси. Уравнение процесса описывается следующим образом:



Образование пузырьков газа происходит по всему объему смеси, что позволяет получить равномерно распределенные поры. Процесс газообразования требует точного контроля температуры, консистенции смеси и дозировки компонентов для обеспечения стабильности и однородности пористой структуры;

– пенообразование считается наиболее экономичным и контролируемым процессом порообразования [36], поскольку в нем отсутствуют химические реакции. Метод пенообразования заключается в создании пор путем введения предварительно приготовленной пены в бетонную смесь. Пена формируется из воды и пенообразователя – поверхностно-активного вещества (ПАВ), которое обеспечивает образование мелкодисперсных пузырьков воздуха. При механическом перемешивании пена равномерно распределяется в бетонной смеси, где стабилизируется добавлением вяжущего материала, такого как цемент или известь. В результате твердения смеси образуется пористая структура, характеризующаяся меньшей плотностью и хорошими теплоизоляционными свойствами. Для пенообразования используют как синтетические, так и

органические (протеиновые) пенообразователи, что позволяет варьировать свойства конечного материала;

– метод аэрации предполагает насыщение бетонной смеси воздухом с использованием механических, либо гидродинамических аэраторов. Воздух вводится в смесь под давлением, а для стабилизации образующихся пузырьков используются добавки ПАВ. В процессе смешивания кислород равномерно распределяется в объеме смеси, благодаря чему формируется пористая структура. Аэрация позволяет варьировать размер пор и плотность конечного материала в зависимости от требований конструкции;

– вибровакuumный метод формирования пористой структуры материала, принципиально отличающийся от традиционных подходов, требующих введения специальных порообразователей [37, 38]. Внутри данных структурно-активных включений иммобилизована газовая фаза, находящаяся в изобарическом равновесии с окружающей средой.

Активация процесса порообразования и формирования коалесцирующей поровой архитектуры требует установления гипобарических условий в надсмесевой зоне. Данный эффект реализуется за счет снижения внешнего давления до критического значения, превышающего структурную прочность матричной системы, что индуцирует латеральную деформацию межфазных границ. Синергетическое воздействие достигается комбинированным воздействием вибрационных нагрузок и контролируемого разрежения.

В ходе вибровакuumной активации происходит дегазация газонаполненных включений с последующим гомогенным перераспределением газовой фазы в объеме композита. Динамическое воздействие способствует релаксации внутренних напряжений и формированию изотропной поризованной матрицы с регулируемыми морфологическими параметрами порового пространства. Этот процесс поризует материал, создавая структуру, характеризующуюся наличием множества мелких, равномерно распределенных пор. Принципиальным отличием данного метода является отсутствие необходимости введения дополнительных

порообразователей, что упрощает технологический процесс и снижает стоимость производства, одновременно с этим позволяя контролировать структуру и свойства получаемого материала;

– метод насыщения формовочной смеси воздухом под давлением основан на физическом принципе, согласно которому количество газа, растворенного в жидкости (в данном случае, в воде, входящей в состав формовочной смеси), прямо пропорционально давлению этого газа над жидкостью [35]. Реализация метода заключается в следующем: в герметичной емкости, выполняющей функцию смесителя, создается повышенное давление воздуха. В этой среде формовочная масса интенсивно перемешивается, что способствует активному растворению воздуха в воде, входящей в состав смеси. Таким образом, происходит насыщение смеси воздухом. После завершения процесса насыщения, полученная смесь выдается в форму, где происходит резкое снижение давления. Вследствие этого, растворенный в воде воздух начинает выделяться в виде множества мелких пузырьков, что приводит к вспучиванию смеси и формированию ячеистой структуры. Оптимальное значение давления воздуха в смесителе определяется на основе технико-экономического обоснования, учитывающего состав смеси, требования к конечным свойствам материала и энергетические затраты;

– комбинированный способ объединяет несколько методов поризации, таких как газообразование и пенообразование, или сочетание аэрации с минерализацией. Комбинация методов позволяет снизить технологические ограничения каждого из них и получить материал с оптимальными характеристиками. Например, сочетание газообразования и пенообразования используется для повышения равномерности порораспределения и улучшения механических характеристик [39].

Поробетон – это двухфазный пористый материал, состоящий из непрерывной твердой фазы (цементная матрица) и дискретной газовой фазы (воздушные поры). Поры в ячеистом бетоне состоят из макропор и микропор. Макропоры образуются в результате перетока газа после добавления газообразующего агента; форма

является сферической или почти сферической, а диаметр пор в основном находится в пределах 0,5-2 мм. В диапазоне от нескольких десятых миллиметра до нескольких миллиметров микропоры существуют в стенке макропор. Пористость ячеистого бетона обычно составляет 70-80 %, при этом микропористость, вызванная водородом, образующимся в результате химической реакции алюминиевой пасты в растворе щелочи либо пенообразователем, составляет около 45-55%; капилляр, оставленный испарением воды, составляет около 20-40%. Для ячеистого бетона макропоры больше, и их намного больше, чем у обычного бетона, что имеет большое влияние на прочность и теплопроводность бетона [40, 41].

Для обеспечения требуемых характеристик поры должны иметь правильную сферическую форму, должны быть закрытыми и равномерно распределяться в объеме бетона. Обычно в ячеистых бетонах наряду со сферическими присутствуют макропоры неправильной формы с рваными краями, а также встречаются цепочки из 2-3 пор длиной 5-6 мм [35]. Поэтому физико-механические свойства ячеистых бетонов зависят не только от величины пористости, но и от равномерности распределения пор по сечению, толщины и прочности межпоровых стенок, однородности пор и стенок. Можно полагать, что прочность ячеистого бетона при сжатии тем выше, чем более равномерна их структура.

Создание более однородной пористой структуры, а также стабилизация стенок газовых пор, позволяющая поробетонной массе достичь такой пластической прочности, при которой уже невозможна ее осадка, способствуют небольшому (на 15%) повышению прочности ячеистого бетона [42].

На теплозащитные и механические характеристики поробетона могут влиять размер пор, распределение пор, форма пор и их связность. Обычно используемые модели теплопроводности включают модель параллельной серии, модель Максвелла Ойкена, модель теории эффективной среды, модель Леви и т.д. Данные модели могут рассчитывать эффективную теплопроводность ячеистого бетона, используя теплопроводность двух фаз в пористом бетоне, т.е.

цементного заполнителя и воздушной фазы, а также соответствующей объемной доли фаз [43].

Соотношение вода-вяжущее в поробетоне связано с полученной степенью аэрации и, следовательно, с плотностью. Для ячеистого бетона меньшее водотвердое отношение приводит к недостаточной аэрации, а более высокое – к разрыву пустот, следствием чего является увеличение плотности в обоих случаях [44]. Таким образом, потребность в воде должна определяться по консистенции свежей смеси, а не по заранее определенному водоцементному или водотвердому отношению.

Оптимизация технологического процесса изготовления ячеистых строительных материалов в значительной степени зависит от выбора метода формирования пористой структуры ячеистобетонной смеси. Ключевым аспектом технологии ячеистого бетона, твердеющего в условиях, отличных от автоклавных, является необходимость достижения высокой степени поризации смеси и поддержания ее стабильности в течение всего процесса. Процесс поризации смеси, как правило, осуществляется на этапе формования.

Формирование ячеистой структуры в процессе изготовления изделий может быть реализовано различными методами, которые классифицируются следующим образом: химический, механический, механохимический и физический [45, 46].

Химический метод формирования пористой структуры основан на организации процесса выделения газообразных продуктов непосредственно в объеме формовочной массы в результате химических реакций между ее компонентами.

Механический метод поризации включает в себя последовательность операций, включающих автономное приготовление растворной смеси на основе кремнеземистого вяжущего и технической пены, с последующим объединением и перемешиванием этих компонентов.

Механохимический метод представляет собой относительно новую технологию, при которой на первом этапе формовочная смесь подвергается

поризации путем введения пены, а затем в этой поризованной массе создаются более крупные ячеистые поры за счет использования газообразователей или других методов, направленных на увеличение пористости материала.

Физический метод основан на принципе снижения давления в системе «раствор-газ», что приводит к объединению мелких газовых пузырьков в более крупные, их расширению и, как следствие, поризации (вспучиванию) смеси [45, 47].

На сегодняшний день разработаны несколько ключевых методов для приготовления пенобетонной смеси, которые применяются для получения пенобетона [48, 49].

Классическая технология производства пенобетона основана на процессе, при котором отдельно приготовленная пена тщательно смешивается с заранее подготовленным раствором, что позволяет добиться однородной структуры смеси. Время перемешивания обычно составляет от 3 до 5 мин, и в результате этого образуется однородная пенобетонная масса.

Метод «сухой минерализации» представляет собой вариацию классической технологии и позволяет получать пенобетон с низкой плотностью. В этом процессе осуществляется совмещение сухих компонентов с пеной низкой кратности, которая подается непрерывно с использованием пеногенератора. Такой подход обеспечивает образование устойчивой пенобетонной смеси с минимальным содержанием свободной воды, что, в свою очередь, способствует улучшению эксплуатационных характеристик конечного продукта [50, 51].

Баротехнология является модификацией методики приготовления пенобетонной смеси. В этом варианте процесс смешивания пены с растворной массой осуществляется в замкнутом герметичном смесителе. После того как компоненты тщательно перемешаны, смесь подвергается воздействию повышенного давления воздуха, который подается в смеситель. Во время этого этапа происходит искусственное уменьшение кратности пены за счет сжатия воздушных пор. Когда пеномасса выходит из поризатора, сжатый воздух в

ячейках расширяется, что в свою очередь приводит к уплотнению межпоровых перегородок и улучшает структуру пенобетона [52-54].

Разнообразие методов создания неавтоклавных цементных пенобетонов обуславливает различные технологические трудности, связанные с необходимостью использования пеногенераторов для получения пены высокой кратности, зависимостью свойств пены от характеристик пенообразователей, необходимостью перенастройки оборудования при изменении параметров пены или плотности пенобетона, вероятностью осадки массы в формах из-за нестабильности пены или ее взаимодействия с вяжущим, необходимостью обеспечения определенных вязкопластичных свойств раствора при механическом распределении пены и требованием использования высокодисперсных цементов с совместимыми составами цемента и пенообразователя при технологии сухой минерализации [54]. В связи с потребностью в малых мобильных производствах и желанием использовать недорогие пенообразователи возникла необходимость разработки малоэнергоёмкой одностадийной технологии производства неавтоклавных пенобетонов [55-57].

Реализация одностадийной технологии синтеза пенобетона обусловлена формированием гетерогенной ячеистой архитектуры в условиях высокоинтенсивного динамического воздействия, включающего механическую гомогенизацию. В отличие от автоклавных аналогов, температурные условия окружающей среды, метрологическая точность дозирования компонентов и консистентные свойства вяжущего компонента с кремнеземистым наполнителем демонстрируют редуцированное воздействие на финальные структурно-механические характеристики материала. Объёмная плотность пенокомпозита приобретает статус регулируемого технологического параметра, допускающего оперативную коррекцию в рамках производственного цикла.

К технологическим преимуществам одностадийного неавтоклавного синтеза следует отнести синхронизацию процессов аэрации и механического диспергирования, инициирующих формирование термодинамически

квазиравновесного состояния, что обеспечивает реологическую стабильность пеноцементной суспензии в формовочных емкостях; адаптивность к локализованным сырьевым ресурсам за счет вариабельности компонентного состава и минимизацию капиталоемкости производства при параллельной оптимизации энергопотребления и трудозатрат, что индуцирует снижение себестоимости конечного продукта.

Метод пенообразования в производстве ячеистых бетонов выделяется своими значительными преимуществами, такими как экономическая эффективность, высокие показатели контролируемости. Использование различных пенообразователей как синтетических, так и органических, позволяет гибко варьировать свойства конечного материала, регулируя параметры пористой структуры и физико-механические характеристики пенобетона.

Таким образом, пенообразование представляет собой эффективный способ производства ячеистых бетонов, позволяющий оптимизировать их свойства в соответствии с требованиями конкретных строительных задач и современными стандартами энергоэффективности и экологической безопасности.

1.3. Повышение эффективности пенобетонов на основе сухих смесей

В составе пенобетонных композитов ключевая роль отводится полиморфным вяжущим агентам, классифицированным по гидратационной активности и прочностным маркам, кремнеземсодержащим матричным компонентам, а также полифункциональным модификаторам. Последние включают: газофазные генерирующие агенты (пенообразователи), структурорегулирующие реагенты, пластифицирующие добавки для повышения предел-текучести суспензии, кинетические активаторы гидратации, реологические модификаторы и технологическую воду [58-60]. Каждый компонент оказывает направленное воздействие на формирование гетерофазной системы, определяя, как макромеханические параметры (прочность на сжатие/изгиб), так и топологию порового пространства (распределение пор по размерам, коэффициент извилистости).

Селекция вяжущего осуществляется на основе анализа кинетики твердения и требований к проектной прочности конечного продукта. Статистически доминирующим связующим остается портландцемент, что обусловлено его экономической доступностью и технологической универсальностью [61]. Однако данный материал демонстрирует ограничения, связанные с пролонгированным периодом первичного схватывания и замедленной эволюцией структурной прочности на ранних стадиях гидратации. Эти факторы индуцируют дисбаланс в оптимизации производственных регламентов, увеличивая длительность технологического цикла и снижая рентабельность массового производства.

Применение портландцемента в производстве пенобетона связано с рядом технологических трудностей. Одной из таких проблем является его высокая водопотребность, которая способствует увеличению седиментационной нестабильности ячеистобетонных смесей. При этом повышенное водоцементное соотношение, необходимое для получения пенобетона низкой плотности, может отрицательно сказаться на равномерности распределения пор и прочностных характеристиках готового материала. Учет этой особенности требует корректной настройки состава смеси и применения различных добавок, стабилизирующих консистенцию [62, 63].

Наиболее оптимальными для решения данных задач являются чистые цементы, не содержащие минеральных добавок. Такие цементы, благодаря своим характеристикам, способны обеспечить требуемую скорость схватывания и твердения. Согласно нормативным требованиям, начало схватывания должно происходить в пределах 1-2 ч, а завершаться не позднее чем через 2,5-3 ч. Важным параметром является и тонкость помола цемента, которая должна находиться в диапазоне 330-400 м²/кг. Тонкий помол повышает активность цемента, что способствует ускорению процессов гидратации и плотному сцеплению компонентов смеси. Эти характеристики делают чистые клинкерные цементы предпочтительными для производства пенобетона, особенно в тех случаях, когда

требуется обеспечить стабильность прочностных и эксплуатационных свойств материала [57].

В пенобетонных технологиях доминируют клинкерные связующие агенты, преимущественно гипсопортландцементы общего назначения. Интродукция даже следовых количеств клинкерных цементов в сырьевую матрицу индуцирует улучшение структурной стабильности, криостойкости и атмосфероустойчивости ячеистых композитов. Однако их применение сопряжено с пролонгированной кинетикой гидратации и замедленной эволюцией прочностных характеристик на начальных стадиях твердения [64-66].

Альтернативным решением выступают гипсо-дефицитные цементные системы, синтезируемые посредством совместного измельчения клинкера с модифицирующими присадками [67, 68]. Эффективность данных композитов подтверждена исследованиями киевской и львовской научных групп, однако, как указано в работе [69], гидратная фаза таких пенобетонов характеризуется отсутствием гидросульфоалюминатов кальция. Данная кристаллохимическая аномалия требует комплексного изучения ее влияния на реологические параметры, механофизические свойства и карбонизационную резистентность материала.

Применение высокоактивных цементов с ускоренной гидратацией (включая специализированные марки) обеспечивает эффективную стабилизацию формирующейся матрицы, нивелируя деструктивные процессы [70-73]. Перспективным направлением является утилизация техногенных продуктов: гранулированных доменных шлаков, активированных твердением, и зол ТЭС, выступающих в роли гидравлических добавок к портландцементу (10-15 мас. %) [74-76]. Данные компоненты демонстрируют мультифункциональный эффект – повышение тиксотропной устойчивости смесей, снижение себестоимости и усиление коррозионной резистентности, обусловленное модификацией поровой морфологии.

Стратегически значимым направлением модернизации пенобетонных технологий выступает внедрение ультрадисперсных поликомпонентных связующих систем, обладающих регулируемой полидисперсностью и оптимизированным фракционным распределением частиц. Как отмечено в работе [77], критическую роль играет синтез специализированных цементных композитов для неавтоклавных ячеистых бетонов с контролируемой удельной поверхностью, достигающей $1100 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Ультратонкий помол цементного клинкера интенсифицирует синхронную гидратацию силикатных и алюминатных фаз, что коррелирует с ростом механической прочности композита [78]. Ускорение гидратационной кинетики в тонкодисперсных фракциях обусловлено не только увеличением реакционной поверхности, но и накоплением кристаллографических дефектов (дислокаций, точечных дефектов) в структуре частиц. Механоактивация при измельчении генерирует поверхностные дефекты типа микротрещин, повышающие химическую активность зерен. Начальная стадия гидратации сопровождается селективным разрушением клинкерных частиц в зонах дефектов с аккомодацией дислокационных перемещений, причем энергия взаимодействия дефектных минералов на 15-20% превышает таковую для идеальных кристаллов [79].

Использование наноструктурированных цементов обеспечивает воспроизводимое получение ячеистобетонных композитов марки *D300* независимо от метода формовки. Интеграция прогрессивных технологических решений и высокоточного оборудования позволяет синтезировать монолитные теплоизоляционные пенобетоны марки *D150*. Инкорпорация ультрадисперсных цементных порошков или коллоидных систем в конструкционно-теплоизоляционные составы (*D500-D700*) стабилизирует тиксотропные свойства смеси на инкубационной стадии гидратации, катализирует формирование гидросиликатного каркаса и повышает эксплуатационную надежность материала. Данный подход расширяет функциональные характеристики продукции и сферы ее применения в энергоэффективном строительстве [80].

Для интенсификации формирования структурной прочности поризованных пенобетонных систем применяются вяжущие низкой водопотребности (ВНВ) [81]. Дифференцирующими признаками ВНВ относительно традиционных портландцементов выступают: субмикронная дисперсность, минимализированная гидрофильность за счет синергетического введения суперпластифицирующих присадок при комбинированном помоле, аномальная кинетика гидратационных процессов и достижение прочностных показателей до 100 МПа. Интеграция ВНВ в технологические регламенты синтеза пенобетона обеспечивает двойной эффект – редукцию расхода цементной матрицы при параллельном увеличении ее реакционной активности.

Согласно исследованиям [82], гидратная фаза ВНВ-композитов демонстрирует принципиально иную морфологию порового пространства: на два порядка снижена доля макрокапиллярных и аэрационных пор (>100 мкм) при доминировании нанопористой структуры (<10 нм). Данная топология, обусловленная сверхнизким водоцементным отношением ($V/C \leq 0,25$), детерминирует экстремальные прочностные характеристики материала.

Механизм действия ВНВ объясняется явлением адсорбционной стабилизации, при котором наноразмерные пластификаторы интеркалируют в дислокационные дефекты и микродефекты цементных зерен [83]. Механохимическая активация в процессе помола индуцирует генерацию дислокационных кластеров и радиальных микротрещин, служащих зонами селективной адсорбции сульфонированных полимеров. Концентрация ПАВ в дефектных областях усиливает локальную гидратацию за счет формирования ион-дипольных комплексов, катализирующих гетерофазные реакции при критически низких значениях V/C .

Комбинированное применение ВНВ с полифункциональными химическими модификаторами позволяет прецизионно регулировать реологическую стабильность пенобетона. Экспериментально валидированы составы, достигающие предела текучести 0,2-0,3 МПа в течение 20-30 мин после

затворения [84]. Данный эффект открывает перспективу внедрения бесшовных формовочных методик для синтеза энергоэффективных пеноблоков с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Экспериментально подтверждена возможность синтеза пенобетона марки D300 с прочностью на сжатие 0,72 МПа на основе ультрадисперсного портландцемента, подвергнутого седиментационной фракционной классификации. Оптимизация гранулометрии связующего компонента обеспечила формирование гомогенной ячеистой структуры с минимальным градиентом плотности. Параллельно разработаны шлакоцементные композиты, применение которых индуцирует рост прочностных показателей ячеистых бетонов на 45-60% [85].

Актуальным трендом в цементной индустрии выступает производство поликомпонентных модифицированных цементных систем, сочетающих повышенную реакционную активность с экономической эффективностью. Данная методология, получившая интенсивное развитие в последнее десятилетие, позволяет интенсифицировать технологические циклы при сокращении энергозатрат [86-88].

Особый научный интерес представляют цеолит-мергелевые композиты, выступающие в качестве реакционноспособных минеральных компонентов для тяжелых бетонных систем. Исследования демонстрируют возможность замещения до 45% портландцемента мергелевыми наполнителями без снижения эксплуатационных характеристик материала [86]. Синергетический эффект достигается при интродукции наноструктурированных синтетических цеолитов, увеличивающих прочность ячеистых бетонов на 45% за счет катализа полимеризации гидросиликатов кальция и консолидации микроструктуры цементного камня.

Инновационные технологические решения в области композиционных вяжущих предусматривают замену 50-70% энергоемкого портландцемента высокоактивными тонкодисперсными минеральными добавками, включая:

модифицированные кварцевые пески; природные силикаты с наноразмерной морфологией; техногенные субстраты (золы, шлаки). Подобные системы формируют плотные гидратные матрицы с повышенной долговечностью [89].

Современные исследования подтверждают возможность целенаправленной модификации цементных систем за счет введения высокоэнергетических минеральных и органоминеральных добавок, обеспечивающих достижение прочности до 100 МПа. Приоритетным направлением признана разработка композитных вяжущих для пенобетонов, позволяющих минимизировать долю клинкерной составляющей без ущерба для механических характеристик [63].

Проведенный обзор позволяет выделить ряд предпосылок для применения тонкомолотого цемента в производстве пенобетонов, включая повышенную реакционную способность, улучшенную структуру цементного камня, возможность экономии цемента и его использования в композиционных вяжущих, стабилизацию пенобетонной смеси, регулирование сроков схватывания и твердения, а также улучшение эксплуатационных характеристик.

В качестве основного структурного компонента ячеистых бетонов традиционно применяется кварцевый песок с модулем крупности $\leq 1,2$. Технологические регламенты производства пенобетонов исключают использование песчаных фракций с модулем крупности свыше 2, что обусловлено негативным влиянием крупнофракционных кварцевых включений, превышающих размерные параметры межпоровых септ, на механические и теплофизические свойства композита. В данной связи технологически оправдано внедрение механически активированных продуктов тонкодисперсного помола, обеспечивающих оптимизацию микроструктуры матрицы бетона за счет повышения плотности упаковки частиц, интенсификации процессов гидратации цементных систем и увеличения прочностных характеристик материала.

Экспериментально подтверждена необходимость применения песчаного сырья с удельной поверхностью 250-300 м²/кг для синтеза пенобетонных композитов плотностью 400-500 кг/м³. Энергетические затраты на механическую обработку минерального наполнителя до заданной дисперсности достигают

25 кВт·ч/т, что при нормированном расходе песка 0,18-0,28 т/м³ соответствует энергоемкости 4,5-7 кВт·ч на единицу объема материала. Учитывая экономическую составляющую, связанную с высокой себестоимостью тонкодиспергированного кварцевого наполнителя (до 30% от общей стоимости производства), актуализируются исследования в области ресурсосберегающих технологий с применением региональных минеральных ресурсов и техногенных отходов [86].

Современные научные разработки [90, 91] демонстрируют перспективность использования пылевидных техногенных продуктов и глиносодержащих материалов в производстве неавтоклавных ячеистых бетонов. Предложенные технологические решения обеспечивают достижение регламентируемых физико-механических показателей при одновременном снижении энергоемкости производственного цикла. Такой подход не только снижает себестоимость, но и решает экологические проблемы, связанные с утилизацией промышленных отходов.

Бентонит – природный глинистый минерал, обладающий способностью к набуханию и высокой адсорбционной емкостью. Эти свойства обусловлены структурой монтмориллонита, который является основным минералом в составе бентонита. Благодаря своей высокой гидрофильности бентонит способен удерживать значительное количество воды, что позволяет существенно повысить водоудерживающую способность гипсовых композитов и предотвратить преждевременную дегидратацию при твердении. Кроме того, присутствие бентонита способствует повышению пластичности смеси и улучшению сцепления между кристаллами гипса, что приводит к формированию более однородной структуры материала [92].

Работа [93] посвящена селективности катионов в глинах и их фиксации. В контексте взаимодействия бентонита с полугидратом гипса в данной работе подчеркивается важность обмена катионов, особенно кальция, который может замещать натрий в структуре бентонита, изменяя его физико-химические свойства. В исследовании [94] представлен обзор взаимодействия цемента с

различными добавками, такими как глины, что служит основой для понимания химических реакций между компонентами и их влияния на прочность и долговечность строительных материалов.

В [95, 96] рассматриваются факторы, контролирующие набухание различных бентонитов, и их связь с гидравлической проводимостью смесей. Это важно для оценки поведения бентонита при взаимодействии с цементом, поскольку изменения в структуре могут влиять на проницаемость.

Введение золы-уноса энергогенерирующих комплексов в пенобетонные композиты индуцирует модификацию гидрофильных характеристик и реологических параметров бетонной матрицы. Гидрофильные свойства золосодержащих систем коррелируют с дисперсностью, морфологией частиц, топографией их поверхности и фазово-минералогическим составом. Применение золы-уноса, характеризующейся сферическими частицами с глобулярной морфологией и остеклованной поверхностью, способствует снижению внутреннего трения системы, что приводит к повышению ее подвижности. Установлена прямая зависимость пластифицирующего эффекта от степени дисперсности материала и доли глобулярных аморфных частиц в его структуре [97].

Включение золы с преобладанием крупнофракционных агрегированных частиц иррегулярной формы провоцирует рост водопотребности смеси вследствие капиллярно-пористой адсорбции влаги. Механоактивация таких частиц методом тонкодисперсного помола позволяет минимизировать их пористость, снижая тем самым гигроскопичность материала [98]. Гигроскопичность золы-уноса возрастает пропорционально концентрации карбонизированных остатков несгоревшего топлива, проявляющих выраженные сорбционные свойства. Поскольку данные включения доминируют в крупных фракциях, их сепарация методом фракционирования позволяет оптимизировать водопотребность системы. Даже высокодисперсные золы демонстрируют повышенную гидрофильность (~46%) по сравнению с инертными заполнителями (например, кварцевым песком – 12%), что актуализирует применение

пластифицирующих модификаторов для регулирования реологии золосодержащих композитов [99].

Микрокремнезем – техногенный продукт синтеза ферросилициевых сплавов и монокристаллического кремния – относится к высокореактивным минеральным добавкам. Его ультрадисперсные частицы (0,1-0,5 мкм) с преобладанием аморфного SiO_2 (85-98%) обладают выраженной гидрофильностью, обуславливающей необходимость увеличения водоцементного отношения для сохранения заданной удобоукладываемости. Экспериментально подтверждено, что введение 1 кг микрокремнезема требует дополнительного расхода воды порядка 1 л [100, 101].

Для нейтрализации данного эффекта практикуется синергетическое использование микрокремнезема с суперпластификаторами поликарбоксилатного или нафталинового типа. Наноразмерные частицы добавки усиливают эффективность пластифицирующих агентов за счет адсорбции их молекул на поверхности твердой фазы, что оптимизирует межчастичные взаимодействия и улучшает структурообразование смеси [102]. Установлено, что тонкодисперсные минеральные компоненты потенцируют действие суперпластификаторов, обеспечивая достижение требуемых реологических и прочностных характеристик композита при снижении общей энергоемкости технологического процесса.

Эффективность пенообразователей, применяемых в технологии строительных материалов, зависит от набора свойств, среди которых – пенообразующая способность вспениваться в водном растворе цемента в процессе вспенивания. Кроме того, характеристики вспенивания зависят от его концентрации в цементной смеси, времени вспенивания раствора, цементного раствора, прочности и различных добавок [103-114].

Все пенообразователи по происхождению делятся на две основные категории: белковые и синтетические.

Протеиновые пенообразователи, синтезируемые из вторичных ресурсов мясной индустрии, обеспечивают генерацию пены со стабильной вязкостью, однако характеризуются ограниченной кратностью, что интенсифицирует

необходимость повышения дозировки реагента или пролонгации времени активации водного раствора, приводя к росту производственных издержек [115, 116]. Синтетические аналоги демонстрируют ускоренное пенообразование, но обладают низкой кинетической стабильностью и могут оказывать деструктивное воздействие на структурную целостность конечного композита.

Современные исследования [117-119] выявили корреляцию устойчивости пеноцементных систем с поверхностно-активными процессами, включая:

- модификацию дзета-потенциала на границе раздела фаз вследствие адсорбции пенообразователя на клинкерных минералах и гидратационных новообразованиях;
- динамику концентрации ионов Ca^{2+} в начальной фазе гидратации;
- химическую интерференцию между поверхностно-активными агентами и компонентами портландцементного клинкера.

Экспериментальные данные [120] подтверждают повышенную химическую активность водных растворов пенообразователей относительно дистиллированной воды, что индуцирует трансформацию морфологии кристаллогидратов. Данный эффект обусловлен диспергированием клинкерных минералов и гидратационных продуктов в результате адсорбции молекул ПАВ на их поверхности.

Оптимизация реологических параметров пены в пенобетонных системах достигается методом ее минерализации. Инкорпорация тонкодисперсных минеральных частиц в пенную матрицу обеспечивает механическую стабилизацию газовых пузырьков за счет формирования барьера, предотвращающего коалесценцию. Структурная прочность системы обусловлена образованием консолидированного поверхностного слоя из адгезированных твердых частиц.

В работах [121, 122] представлены результаты апробации анионных ПАВ, синтезированных методом гидролиза животного белка в комбинации с гидрофильными карбамидными смолами. Разработанные стабилизаторы

ингибируют дренаж жидкости из межпузырьковых пленок, увеличивая временной интервал жизни пены. Критерии выбора пенообразователей включают: экономическую эффективность, химическую стабильность, срок годности (≥ 1 года), удельный расход, параметры кратности и свежести раствора.

Современные пенобетонные композиты, помимо базовых компонентов (минеральных вяжущих и инертных заполнителей), могут содержать комплекс химических модификаторов, функционализированных для коррекции эксплуатационных характеристик. Инкорпорация таких аддитивов обеспечивает оптимизацию конструкционной легкости, гидрофильных свойств, а также повышение прочностных, гидрофобных и криостойких параметров отвержденного материала.

Пластифицирующие агенты проявляют мультифункциональное воздействие на цементные системы: интенсифицируют набор прочности при снижении водоцементного отношения, модифицируют кинетику гидратационных процессов. Даже при минимальных концентрациях (0,1-1,5% от массы вяжущего) данные добавки существенно трансформируют реологию пенобетонных смесей и микроструктуру конечного продукта.

Механизм действия пластификаторов связан с модификацией структуры сольватных оболочек гидратирующихся цементных частиц. Адсорбция ПАВ на поверхности твердой фазы индуцирует перераспределение воды: сокращение объема связанной жидкости в гидратных слоях компенсируется ростом доли свободной воды. Данный процесс улучшает удобоукладываемость смеси, однако одновременно ингибирует кинетику схватывания, что ограничивает применение пластификаторов в пенобетонных технологиях из-за их дестабилизирующего влияния на пенную матрицу [123-125].

При гидратации цемента наблюдается явление флокуляции – агрегации частиц в кластеры (флоккулы), снижающей реакционную активность системы и провоцирующей седиментационную неустойчивость. Пластифицирующие добавки, выступая дефлокулянтами, диспергируют цементные конгломераты,

повышая степень гидратации вяжущего и стабилизируя дисперсную систему [126].

Несмотря на значительный прогресс в области ячеистых бетонов, использование тонкодисперсных наполнителей, особенно полученных из промышленных отходов, остается недостаточно изученным. Исследования в этой области сосредоточены в основном на изучении влияния отдельных видов наполнителей на свойства бетона, в то время как комплексные исследования, учитывающие взаимодействие различных наполнителей и их влияние на микроструктуру и долговечность материала, остаются ограниченными. Более глубокое понимание механизмов взаимодействия тонкодисперсных наполнителей с цементной матрицей и пенообразователем необходимо для разработки оптимальных рецептур пенобетона с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Оптимизация рецептур пенобетонов требует комплексного подхода, включающего подбор пенообразователей, обеспечивающих стабильную пористую структуру, и модификаторов, регулирующих процессы гидратации цемента и структурообразования. Необходимо учитывать влияние этих компонентов на водоудерживающую способность, прочность и морозостойкость материала.

1.4. Методы контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов

1.4.1. Методы определения пористости ячеистых бетонов

Для эффективного проектирования и использования ячеистых бетонов необходимо иметь подробное представление о их пористой структуре. Поры и каналы внутри бетонной матрицы играют ключевую роль в определении физических и механических характеристик материала, таких как прочность, тепло- и звукоизоляция.

Понимание пористой структуры ячеистых бетонов не только способствует разработке более эффективных строительных материалов, но также позволяет

оптимизировать процессы производства и улучшить экологические характеристики бетонных конструкций.

Определение пористой структуры ячеистых бетонов может быть выполнено с использованием разнообразных методов и техник (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Методы определения пористости ячеистых бетонов

Метод компьютерной томографии (КТ) основан на регистрации рентгеновского излучения, проходящего через образец бетона, с последующей реконструкцией трехмерного распределения плотности материала. В отличие от классической рентгенографии, КТ обеспечивает пространственную визуализацию микропор и каналов с разрешением до микронного уровня, сохраняя целостность образца [127]. Однако применение метода ограничено необходимостью использования радиационной защиты, а также сложностью анализа материалов с низким контрастом плотности между матрицей и порами.

Микроскопические методы, включая оптическую и сканирующую электронную микроскопию (SEM), позволяют исследовать морфологию ячеистых бетонов на разных масштабах. Оптическая микроскопия, использующая видимый свет, применяется для анализа макропористой структуры на шлифах образцов, но обладает ограниченным разрешением. SEM, основанный на взаимодействии сфокусированного электронного пучка с поверхностью образца, обеспечивает наноразмерное разрешение, выявляя детали морфологии и распределение микропор [128].

Гидростатическое взвешивание (плотиметрия), базирующееся на законе Архимеда, определяет среднюю плотность материала, но не дифференцирует поры по размерам и распределению. Ртутная порозиметрия, основанная на интрузии ртути в поры под давлением, позволяет количественно оценить размеры и объем пор, однако требует соблюдения строгих мер безопасности из-за токсичности ртути.

Ультразвуковые методы анализируют распространение акустических волн через материал, фиксируя время задержки и амплитуду сигнала. Эти параметры коррелируют с пористостью и структурными неоднородностями, что делает метод эффективным для неразрушающего контроля [129-131].

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) исследует релаксационные характеристики ядерных спинов (преимущественно протонов воды) в магнитном поле, предоставляя данные о распределении влаги в порах. Метод высокочувствителен к материалам с повышенной влажностью, но требует дорогостоящего оборудования [132].

Рентгенография, основанная на поглощении рентгеновских лучей, визуализирует внутренние дефекты и зоны разной плотности. Высокое разрешение метода компенсируется невозможностью точной дифференциации компонентов с близкой плотностью, а также необходимостью радиационной защиты [133].

Метод анализа изображений начинается с оцифровки поверхности ячеистого бетона, при которой цифровая фотокамера захватывает серию изображений поверхности. Эти снимки делаются при последовательном освещении ячеистого бетона световыми лучами, падающими под разными углами [134, 135]. Полученные изображения затем импортируются в специализированную программу для обработки. В этой программе происходит последовательное сравнение интенсивности красной, зеленой и синей составляющих каждого пикселя на серии изображений. Новое изображение формируется с учетом интенсивности каждого пикселя, приближенной к черному цвету.

Для получения цифровых изображений поверхности ячеистого бетона применяются красящие составы [136], включающие предварительную обработку поверхности материала следующим образом: сначала проводится шлифовка для достижения ровной однородной поверхности, затем поверхность подвергается продувке компрессором. Далее поверхность равномерно покрывается пигментной смесью на основе черной водорастворимой гуаши, после чего происходит сушка, повторная шлифовка и повторная продувка. Оцифровка поверхности ячеистого бетона осуществляется с использованием бытового планшетного сканера, и затем определяются параметры пористости данного материала.

Данные методы являются наименее трудоемкими за счет отсутствия необходимости применения специализированного оборудования.

Методы оценки пористой структуры ячеистых бетонов предоставляют важную информацию о внутренней структуре этих материалов, что имеет решающее значение для их улучшения и оптимизации. Существует разнообразие методов, каждый из которых обладает своими уникальными преимуществами и ограничениями.

Макропористость ячеистого бетона, определяемая наличием в его структуре крупных воздушных или газовых полостей, является ключевым параметром, влияющим на физико-механические и теплотехнические свойства материала. Для ее количественной оценки применяются методы, основанные на различных физических принципах, каждый из которых раскрывает специфические аспекты пористой структуры.

Среди методов, основанных на взаимодействии материала с жидкостями, выделяется гравиметрический подход, базирующийся на измерении водопоглощения. Процедура предполагает иммерсионное насыщение предварительно высушенных образцов водой с последующим расчетом коэффициента абсорбции через разность масс до и после гидратации. Этот показатель, хотя и не детализирует распределение пор, служит интегральным индикатором макропористости и широко используется для оперативного контроля качества материала в строительной практике [137].

Другой подход – газоволюметрический анализ – основан на инъекции инертного газа (гелия) в поры образца под контролируемым давлением. Изменение объема газа, описываемое уравнением состояния, позволяет рассчитать суммарный объем макропор. Метод обеспечивает высокую точность при оценке общей пористости, но не дифференцирует поры по размерам, что ограничивает его применение в исследованиях, требующих детальной структурной информации [128].

Для оценки скорости проникновения жидкости в материал применяется метод капиллярной инфильтрации. Измерение кинетики насыщения образца водой под действием градиента давления коррелирует с развитостью макропористой сети: высокая скорость инфильтрации свидетельствует о преобладании крупных взаимосвязанных пор. Этот метод, наряду с простотой исполнения, эффективен для сравнительного анализа проницаемости различных составов ячеистого бетона [139].

В отличие от предыдущих методов, адсорбционно-десорбционный анализ азота фокусируется на взаимодействии газовой фазы с поверхностью пор. Регистрация изотерм адсорбции при варьирующем давлении позволяет выделить вклад макропор в общую пористость по характеристическому участку кривой в области высоких давлений. Метод обеспечивает дифференциацию пор по размерам (макро-, мезо-) и выявление их распределения, однако требует использования вакуумного оборудования и сложной обработки данных, что ограничивает его применение в рутинных исследованиях [140].

Сравнительный анализ методов выявляет их комплементарность. Гравиметрия и инфильтрация, обладая простотой исполнения, дают интегральные показатели, полезные для оперативного контроля. Газоволюметрия, обеспечивая точность в определении общего объема пор, не учитывает их морфологическое разнообразие. Адсорбция азота, при всей информативности, остается ресурсоемкой процедурой. Комбинирование этих подходов, например, совместное использование гравиметрии и газоволюметрии, позволяет построить многопараметрическую модель пористой структуры, включая данные о размере, форме и распределении

полостей. Такая интеграция критически важна для оптимизации состава ячеистых бетонов, где макропористость напрямую влияет на баланс между теплоизоляционными и прочностными характеристиками [137-140].

Методы определения макропористости ячеистых бетонов предоставляют разносторонний анализ пористой структуры материала. Различные методики выделяют разные аспекты макропористости, что способствует более глубокому и всестороннему пониманию свойств ячеистых бетонов. Сочетание различных подходов обогащает информацию о размерах, форме и распределении пор в материале.

Важно отметить, что каждый метод обладает своими уникальными характеристиками и преимуществами. Например, метод адсорбции азота предоставляет высокую разрешающую способность для оценки макро- и мезопор, в то время как измерение объема пор (мерцание) может быть более удобным для оценки больших пор. Комбинированное применение этих методов обогащает анализ и позволяет получить более полную картину о пористой структуре ячеистых бетонов.

Важным аспектом является мультискейловый анализ, который предполагает сочетание различных методов с разными уровнями разрешения и глубины анализа. Это позволяет получить полное представление о пористой структуре на разных уровнях. Кроме того, большинство из этих методов неинвазивны и не разрушают материал, что важно при изучении пористой структуры. Они позволяют изучать материал, не повреждая его.

Однако следует учесть, что многие из этих методов требуют специализированного оборудования и экспертизы для правильного применения и интерпретации результатов.

Таким образом, методы оценки пористой структуры ячеистых бетонов представляют собой важный инструмент при их производстве и исследовании. Сочетание различных методов позволяет получить наиболее полное представление о внутренней структуре материала, что способствует его более эффективному использованию в строительстве и других областях применения.

1.4.2. Типы изображений и способы их получения

Традиционные методы исследования пористой структуры, такие как ртутная порометрия и адсорбционные методы, хотя и предоставляют необходимую информацию, но не позволяют визуализировать пространственное распределение пор, их форму и взаимосвязанность, что является критически важным для понимания процессов, происходящих в материале [128].

В этом контексте метод анализа изображений, основанный на обработке и количественной оценке цифровых изображений, представляет собой более качественный и, в целом, упрощенный инструмент для исследования пористой структуры ячеистых бетонов. Данный метод позволяет получать детальную информацию о размерах, форме, распределении и взаимосвязанности пор, что имеет решающее значение для оптимизации характеристик ячеистого бетона и получения пористых композитов с заданными свойствами.

Для оценки пористой структуры ячеистых бетонов используются различные типы изображений (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Типы изображений и способы их получения

Оптические изображения, такие как фотографии и видео, являются одним из наиболее распространенных и доступных типов изображений для визуального анализа пористой структуры бетона [127, 129].

Изображения могут быть получены с помощью различных видов камер, включая:

- камеры с высоким разрешением, такие как цифровые зеркальные фотокамеры или специализированные промышленные камеры, использование которых позволяет получать детализированные изображения с высоким разрешением, что облегчает идентификацию и анализ мелких пор и структурных особенностей;

- оптические микроскопы, такие как стереомикроскопы, металлографические микроскопы и конфокальные микроскопы, используются для получения изображений пористой структуры бетона с высоким увеличением и разрешением. Они позволяют визуализировать мельчайшие детали, недоступные для обычных камер;

- специальные камеры для визуализации бетона, разработанные специально для визуализации и анализа бетонных конструкций, оснащенные различными функциями, такими как ультрафиолетовая или инфракрасная подсветка, для выявления скрытых дефектов и особенностей структуры.

Также необходимо учитывать формат получаемых изображений. Например, формат `.RAW` для изображений представляет собой формат файла, который сохраняет данные с датчика изображения цифровой камеры без какой-либо обработки или сжатия, таким образом, данные `.RAW` содержат всю информацию, зафиксированную датчиком, включая необработанные данные о цвете и яркости. За счет этого файлы `.RAW` содержат больше информации о каждом пикселе, что дает больше возможностей для редактирования и коррекции изображения в постобработке. Также формат `.RAW` часто сохраняет большой динамический диапазон (разница между самым светлым и самым темным участком изображения), что позволяет сохранить больше деталей в тенях и высветить области, которые могли бы быть потеряны в `.JPEG`.

Рентгеновские изображения, такие как рентгеновские снимки, являются мощным инструментом для визуального анализа пористой структуры бетона. Они

позволяют визуализировать внутреннюю структуру материала, включая поры, трещины и другие характеристики, которые могут быть невидимыми на оптических изображениях [130]. Рентгеновские изображения могут быть получены с помощью следующих методов:

- рентгеновская радиография основана на регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через образец. Различия в плотности материала приводят к различиям в поглощении рентгеновских лучей, что позволяет визуализировать внутреннюю структуру;

- рентгеновская компьютерная томография представляет собой неразрушающий метод, который использует серию рентгеновских снимков, полученных под различными углами, для создания трехмерного изображения внутренней структуры образца. Этот метод позволяет получать детальную информацию о распределении пор и их взаимосвязанности [133];

- микрофокусная рентгеновская томография использует рентгеновский источник с очень маленьким фокусным пятном, что позволяет получать изображения с высоким разрешением и детализацией. Он особенно полезен для анализа мелких пор и структурных особенностей [12].

Контрастные изображения представляют собой специальные типы изображений, которые помогают выделить и визуализировать конкретные области интереса, такие как поры, пустоты и другие характеристики структуры бетона [134]. Они могут быть получены с помощью различных методов, включая:

- контрастирование с использованием красителей или проникающих жидкостей, при котором образец бетона обрабатывается специальными красителями или проникающими жидкостями, которые избирательно окрашивают или заполняют поры и пустоты. Это позволяет резко выделить пористую структуру на изображениях;

- контрастирование с использованием флуоресцентных красителей может быть использовано для окрашивания пор и пустот, что позволяет получать

контрастные изображения при возбуждении специальным излучением (например, ультрафиолетовым);

- контрастирование с использованием рентгеноконтрастных агентов основано на применении рентгеноконтрастных агентов, которые избирательно заполняют поры и пустоты, создавая контраст на изображениях;

- обработка изображений с использованием специальных алгоритмов основана на применении различных алгоритмов обработки изображений, которые могут быть использованы для повышения контраста и выделения областей интереса, таких как поры и пустоты.

Преимущества контрастных изображений заключаются в их способности четко визуализировать пористую структуру, что облегчает ее анализ и количественную оценку. Однако некоторые методы контрастирования могут быть инвазивными и потенциально повлиять на структуру образца.

Спектральные изображения представляют собой изображения, полученные с использованием различных диапазонов электромагнитного спектра, таких как ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный. Они могут быть использованы для визуального анализа пористой структуры бетона, поскольку различные компоненты материала могут иметь различные спектральные характеристики. Спектральные изображения могут быть получены с помощью следующих методов:

- гиперспектральная визуализация использует специальные камеры или сканеры, которые регистрируют изображения в большом количестве узких спектральных диапазонов. Полученные данные могут быть проанализированы для выявления спектральных особенностей, связанных с пористой структурой;

- мультиспектральная визуализация использует камеры или сенсоры, чувствительные к нескольким широким спектральным диапазонам (например, видимому, ближнему инфракрасному и коротковолновому инфракрасному). Анализ изображений в различных диапазонах может помочь выявить особенности пористой структуры;

– флуоресцентная визуализация основана на регистрации флуоресцентного излучения, возбуждаемого в образце при облучении ультрафиолетовым или видимым светом. Флуоресцентные свойства могут быть связаны с пористой структурой и использоваться для ее визуализации.

Важно отметить, что для получения наиболее полной информации о пористой структуре ячеистых бетонов часто используется комбинация различных типов изображений, поскольку каждый тип имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного типа изображений зависит от целей исследования, доступного оборудования и ресурсов.

Основные методы анализа изображений представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные методы анализа изображений

Метод	Особенности	Разновидности
1	2	3
Распознавание объектов	Распознавание объектов требует обработки больших объемов данных и использования мощных алгоритмов машинного обучения, таких как сверточные нейронные сети (CNN), для выявления уникальных характеристик объектов на изображениях	Одноэтапные методы (YOLO, SSD): Эти методы выполняют распознавание и локализацию объектов в одну стадию, что обеспечивает высокую скорость обработки
		Двухэтапные методы (R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN): Эти методы разделяют задачу на две стадии: сначала выделяются регионы, потенциально содержащие объекты, а затем выполняется их классификация
Сегментация изображений	Сегментация может быть полуавтоматической или полностью автоматической. Она широко используется в медицинской визуализации, обработке сигналов и других областях для выделения и анализа конкретных областей изображения	Сегментация на основе порогового значения: Пиксели изображения разделяются на сегменты на основе их интенсивности или цвета относительно заданного порогового значения
		Сегментация на основе регионов: Изображение разделяется на регионы на основе сходства пикселей по определенным критериям, таким как цвет, текстура или интенсивность
		Сегментация на основе границ: Выделение границ объектов на изображении с последующим объединением пикселей внутри этих границ в сегменты
		Семантическая сегментация: Каждому пикселю изображения присваивается метка, соответствующая определенному классу объектов, что позволяет выделить и проанализировать различные семантические объекты на изображении

1	2	3
Классификация	Классификация часто использует методы машинного обучения и глубокого обучения для обучения моделей на больших наборах данных с целью распознавания различных классов объектов или сцен на изображениях	CNN: Эти глубокие нейронные сети, состоящие из сверточных, пулинговых и полносвязных слоев, широко используются для классификации изображений благодаря их способности извлекать сложные признаки и обобщать данные
		Метод опорных векторов (SVM): Этот метод строит гиперплоскость, максимально разделяющую классы в пространстве признаков, и может быть использован для классификации изображений
		Метод k-ближайших соседей (k-NN): Этот метод классифицирует изображения на основе сходства их признаков с признаками изображений из обучающего набора данных
Детекция объектов	Детекция объектов сочетает в себе задачи распознавания объектов и определения их местоположения на изображении. Это более сложная задача по сравнению с простой классификацией, поскольку требует точного определения границ объектов	Методы на основе глубокого обучения (R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO, SSD): Эти методы используют сверточные нейронные сети для выделения регионов, потенциально содержащих объекты, и их последующей классификации
		Методы на основе традиционных признаков (HOG, SIFT, SURF): Эти методы извлекают признаки из изображений, такие как гистограммы ориентированных градиентов (HOG) или локальные дескрипторы (SIFT, SURF), и используют их для обнаружения и классификации объектов

Таким образом, использование методов анализа изображений в исследованиях пористой структуры ячеистых бетонов позволяет не только качественно оценить их характеристики, но и проводить более глубокие исследования влияния различных факторов на пористую структуру и свойства бетонов. Такие исследования имеют важное практическое значение для разработки более эффективных методов производства и использования бетонов с оптимальными физико-механическими характеристиками.

Важно отметить, что для получения наиболее полной информации о пористой структуре ячеистых бетонов часто используется комбинация различных типов изображений, поскольку каждый тип имеет свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного типа изображений зависит от целей исследования, доступного оборудования и ресурсов.

1.5. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистых бетонов

Изучение структуры ячеистого бетона приобретает большое значение в современном мире из-за многочисленных преимуществ этого материала. Однако реальная структура пор ячеистого бетона представляет собой сложную и хаотичную систему. Эти поры имеют различные размеры и формы, что затрудняет их точное измерение и анализ. Даже если у пор общие характеристики, например, объемные свойства, их формы могут значительно различаться, что делает полный анализ структуры пор более сложным и трудоемким. Поэтому для более точного понимания внутренней структуры материала необходимы более точные методы измерения и анализа, которые позволяют лучше охарактеризовать разнообразие форм пор. В настоящее время существуют некоторые параметры, используемые для понимания структуры пор ячеистого бетона, такие как форма пор и их распределение по размерам и др., однако они имеют свои ограничения и не всегда могут обеспечить полное исследование и описание всего многообразия структуры пор.

Фактическая морфология пористой микроструктуры более сложна, чем обычная форма, выраженная в целочисленных измерениях, таких как точка, линия, плоскость и пространство, определенные в евклидовой геометрии. Чтобы оценить реалистичные геометрические характеристики такой структуры, в конце 1970-х гг. математик Бенуа Мандельбротом была введена фрактальная геометрия [141]. Согласно фрактальной геометрии, фрактальной структурой можно считать структуру, обладающую характеристиками самоподобия и рекурсивности, в которой небольшая часть структуры подобна всей структуре и повторяется в пределах определенного масштаба. Хотя фрактальная структура представляет собой структурно сложную и хаотическую систему, ее можно количественно определить как нецелое фрактальное измерение с помощью теоретических выражений. Следовательно, сложные геометрические характеристики пористой структуры внутри пористой микроструктуры могут быть количественно оценены через нецелые фрактальные размерности [142, 143].

Геометрически сложная форма пористой структуры материала формируется в результате серии процессов газовыделения и гидратации вяжущего и представляет собой фрактальную структуру с очевидными фрактальными характеристиками с точки зрения распределения пор по размерам и извилистости связывающих поры путей. Следовательно, если структура пор анализируется с использованием параметров геометрической характеристики фрактальных размеров вместе с существующими параметрами объемной характеристики, сложная структура пор может быть проанализирована более эффективно, поскольку два типа параметров действуют дополняюще [144].

Модели, разработанные для описания геометрических характеристик с точки зрения распределения пор по размерам, обычно подразделяются на три концепции, основанные на теоретических принципах: фрактал поверхности пор, фрактал массы пор и фрактал твердой массы [145]. Эти три концепции фрактальных моделей описывают характеристики распределения пор по размерам микроструктуры в трех аспектах: поверхность пор, объем пор и объем твердого тела соответственно. Однако на сегодняшний день эти модели по-разному используются разными исследователями без учета внутренних свойств анализируемых материалов.

Следовательно, чтобы получить отдельные результаты и сделать возможным сравнение с другими результатами исследований, посвященных различным пористым материалам, необходимо определить репрезентативную фрактальную концепцию, подходящую для анализа поровой структуры вяжущего материала. Более того, исследования, основанные на таком учете свойств материалов, необходимы для практического использования [146, 147].

Фрактальная геометрия позволяет описывать сложные геометрические объекты, такие как пористые материалы, с помощью фрактальных размерностей, которые отражают степень нерегулярности поверхности материала.

Расчет фрактальной размерности играет ключевую роль в применении теории фракталов на практике. Существуют различные методы расчета фрактальной размерности [146].

Метод ячеек разбивает изображение или объект на сетку квадратных ячеек заданного размера. Затем определяется, сколько ячеек содержат часть объекта. При изменении размера ячеек результаты снова оцениваются, и повторяются до тех пор, пока не будет достигнута определенная граница размера ячейки. После этого происходит расчет фрактальной размерности на основе соотношения между размером ячейки и количеством ячеек, содержащих объект.

Метод подсчета размерностей применяется для определения фрактальной размерности изображений, содержащих клеточные структуры. Этот метод основан на предположении, что клетки являются однородными объектами и имеют одинаковую яркость и цвет.

Метод периметра используется для определения фрактальной размерности границ объектов. Периметр объекта измеряется на разных масштабах, и полученные данные используются для вычисления фрактальной размерности.

Метод анализа спектра мощности применяется для определения фрактальной размерности сигналов, таких как звуковые сигналы или электрокардиограммы. Спектр мощности сигнала представляет собой график зависимости мощности сигнала от частоты, и фрактальная размерность сигнала определяется по наклону графика спектра мощности.

Метод растущих квадратов также основан на размещении квадратов различного размера на изучаемом объекте. Здесь начинается с квадрата минимального размера, затем постепенно увеличивается размер квадратов и определяется, сколько из них покрывает объект. Фрактальная размерность вычисляется на основе того, как количество квадратов меняется в зависимости от их размера. Для определения фрактальной размерности методом рассеивания используются геометрические преобразования, чтобы оценить структуру объекта при разных масштабах. Объект разбивается на части, которые затем масштабируются, перемещаются и поворачиваются. Анализируется, как эти преобразования влияют на структуру объекта, и на основе этих изменений определяется его фрактальная размерность.

Метод Фурье использует преобразование Фурье для анализа частотных характеристик текстур или структур. Он основан на связи между фрактальной размерностью и наклоном графика логарифма спектра мощности. Анализируя спектральные характеристики объекта, можно определить его фрактальную размерность.

Метод хаоса используется для создания фрактальных фигур и последующего анализа их структуры. Он основан на стохастическом алгоритме, который создает фрактальные фигуры, и их структура анализируется для вычисления фрактальной размерности [149].

Таким образом, изучение структуры ячеистого бетона, особенно с применением фрактальной геометрии, открывает новые возможности для понимания и оптимизации его свойств. Фрактальный анализ позволяет количественно оценить сложную геометрию пор, что необходимо для более точного прогнозирования механических и теплофизических характеристик материала. Различные методы расчета фрактальной размерности, такие как метод ячеек, подсчета размерностей, периметра, анализа спектра мощности, растущих квадратов, рассеивания, Фурье и хаоса, предоставляют инструменты для всестороннего исследования поровой структуры.

1.6. Выводы

1. Проведенный анализ современного состояния рынка ССС выявил ряд ключевых тенденций, определяющих его динамику и перспективы развития. Отмечается устойчивая тенденция к увеличению объемов производства и потребления ССС, что обусловлено ростом строительной активности как в жилищном, так и в коммерческом секторах, а также реализацией масштабных инфраструктурных проектов. Данный рост стимулируется потребностью в повышении энергоэффективности и экологической безопасности строительных объектов, что способствует внедрению инновационных технологий и материалов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками.

2. Важным фактором, оказывающим влияние на развитие рынка ССС, является государственная поддержка строительной отрасли и политика импортозамещения, направленная на стимулирование отечественного производства и снижение зависимости от импортных поставок. Внедрение передовых технологических решений и материалов, отвечающих современным требованиям к качеству и безопасности, также способствует повышению конкурентоспособности российских производителей на внутреннем и внешнем рынках.

3. Растущая значимость экологических аспектов в строительстве проявляется в увеличении спроса на ССС, содержащие переработанные компоненты, добавки на основе биомассы и материалы с низким уровнем выбросов CO_2 . Производители активно разрабатывают и внедряют инновационные рецептуры, соответствующие принципам устойчивого развития и минимизирующие негативное воздействие на окружающую среду, что является необходимым условием для соответствия требованиям современных строительных стандартов.

4. Проведенный анализ различных факторов, влияющих на структуру и свойства ячеистого бетона, однозначно свидетельствует о критической важности выбора оптимального метода порообразования и тщательного контроля параметров технологического процесса. Только в этом случае возможно достижение желаемых характеристик материала, отвечающих требованиям конкретного строительного проекта и обеспечивающих его долговечность, надежность и энергоэффективность.

5. Использование методов анализа изображений в исследованиях пористой структуры ячеистых бетонов позволяет не только качественно оценить их характеристики, но и проводить более глубокие исследования влияния различных факторов на пористую структуру и свойства бетонов. Такие исследования имеют важное практическое значение для разработки более эффективных методов производства и использования бетонов с оптимальными физико-механическими характеристиками. Для получения наиболее полной информации о пористой

структуре ячеистых бетонов часто используется комбинация различных типов изображений, поскольку каждый тип имеет свои преимущества и ограничения.

6. Выбор конкретного метода фрактального анализа зависит от типа изучаемого материала и цели исследования. Однако учет внутренних свойств материала и выбор репрезентативной фрактальной концепции являются ключевыми для получения достоверных результатов и сопоставимости с другими исследованиями. Дальнейшие исследования в этой области позволят создать более эффективные модели для описания структуры ячеистого бетона и разработки новых материалов с улучшенными характеристиками.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования были проведены в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова в лаборатории кафедры строительства и городского хозяйства, Центра высоких технологий, испытательном центре «БГТУ-сервис», лаборатории ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ».

Оценка влияния составов, соотношения компонентов и технологий производства на характеристики пенобетона проводилась с использованием теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Образцы, изготовленные в лабораторных условиях и прошедшие испытания в лабораториях и специализированных центрах, стали основой для научного анализа. Для интерпретации результатов применялся комплексный научный подход и системно-структурный анализ современных исследований в области строительного материаловедения.

2.1. Характеристика применяемых материалов

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Белгородский цементный завод», соответствующий ГОСТ 30515-2013 [150] и ГОСТ 31108-2020 [151].

Химический состав портландцементов приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав портландцемента

Портландцемент	Содержание, %								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	п.п.п.	прочее
ЦЕМ I 42,5Н	64,72	22,49	4,77	4,40	0,43	2,04	0,20	1,5	0,95

Минеральный состав и технические параметры портландцемента приведены в таблице 2.2.

Применявшийся цемент полностью соответствует предъявляемым к нему требованиям.

Таблица 2.2 – Минеральный состав и технические параметры портландцемента

Показатель	Значение
Минеральный состав клинкера, мас. %	
C ₃ S	61
C ₂ S	17
C ₃ A	5
C ₄ AF	12
Тонкость помола: остаток на сите № 008, мас. %	10
удельная поверхность, м ² /кг	290-330
Нормальная плотность цементного теста, %	25
Сроки схватывания, мин	
начало	150
конец	210
Активность при пропаривании, МПа	34,2

В качестве применяемых сухих пенообразующих веществ были использованы Esaron 1214 и ASCO 93 АО «ЕвроХим».

Порообразователь Esaron 1214 применяется для создания дополнительной поризации в создаваемом композите, в качестве пластификатора и дополнительного смачивателя [152]. Технические характеристики порообразователя Esaron 1214 представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики порообразователя Esaron 1214

Показатель	Значение
Состав	Лаурил сульфат натрия
Внешний вид	Мелкий белый порошок
Влажность, %	около 2
pH (8% раствора)	9,5-10,5
Плотность, г/см ³	около 0,35
Растворимость	Растворим в холодной и теплой воде

ASCO 93 является сильным порообразователем, а также смачивателем и пластификатором в строительных материалах на основе цемента и гипса [153].

Технические характеристики порообразователя ASCO 93 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики порообразователя ASCO 93

Показатель	Значение
Состав	Анионный ПАВ на базе высокомолекулярного олефинсульфоната
Внешний вид	Мелкий белый порошок (может иметь желтоватый оттенок)
Активное вещество, %	min 93
Сульфат натрия, %	max 5
Растворимые в петролейном эфире вещества (РЕЕ), %	max 3
Белизна (Hunt «L»), %	min 90

В качестве применяемых жидких пенообразующих веществ были использованы синтетический пенообразователь «ПО-6НП» и протеиновый пенообразователь «Эталон».

Синтетический пенообразователь «ПО-6 НП» производства ООО «Новочеркасский завод синтетических продуктов» (г. Новочеркасск, Ростовская обл.) представляет собой смесь вторичных алкилсульфатов натрия. Выпускается согласно ТУ 38-00-05807999-33-95 [154]. Предназначен для получения пены средней и высокой кратности, применяемой для тушения пожаров классов А и В.

Протеиновый пенообразователь «Эталон», изготовленный по ТУ 2483-003-13420175-2015 [155] производства ООО «Аист» (г. Челябинск), предназначен для изготовления технической пены, используемой при производстве пенобетона. Экологически безопасен, биоразлагаем.

Технические характеристики пенообразователей (согласно паспортным данным) приведены в таблице 2.5.

В качестве водопоглощающей добавки для перевода жидкого пенообразователя в сухое состояние использовалась гидроизоляционная добавка «Пенетрон Адмикс», изготовленная ООО «Завод гидроизоляционных материалов «Пенетрон» по ТУ 5745-001-77921756-2006 [156].

Технические характеристики добавки «Пенетрон Адмикс» представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.5 – Технические характеристики пенообразователей

Показатель	Ед. изм.	Пенообразователи	
		ПО-6 НП	Эталон
Химическая формула		$C_nH_{2n+1}CH(CH_3)OSO_3Na$	$HSCH_2CH(NH_2)COOH$
Плотность при 20°C	г/см ³	1,01-1,10	1,11-1,12
Водородный показатель	-	7,0-10,0	6,5-8,0
Кинематическая вязкость при 20°C	м ² /с	8,8	4,2
Кратность пены	-	не более 200	7-50
Стабильность пены	мин	68	125

Таблица 2.6 – Технические характеристики добавки «Пенетрон Адмикс»

Показатель	Значение
Внешний вид	Сыпучий порошок серого цвета, не содержащий комков и механических примесей
Влажность, мас. %, не более	0,6
Насыпная плотность в стандартном неуплотненном состоянии, кг/м ³	1020±70
Кислотность среды применения, pH	3-11
Температура эксплуатации, °C	от -60 до +130

В качестве стабилизатора пены применялась бентонитовая глина с долей монтмориллонита не менее 85% компании ООО «Бентонит Хакасии» (г. Черногорск, Россия) и бентонитовая глина компании ТОО «ТАГБЕНТ» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан), соответствующие требованиям ГОСТ 28177-89 [157]. Бентонитовые глины были задействованы в роли добавки стабилизатора технической пены.

Для образцов глин был определен гранулометрический состав. Интегральное и дифференциальное распределение частиц бентонитовых глин по размерам показано на рисунке 2.1. Химический состав бентонитовых глин представлен в таблице 2.7. Микроструктура бентонитовой глины ТОО «ТАГБЕНТ» представлена на рисунке 2.2.

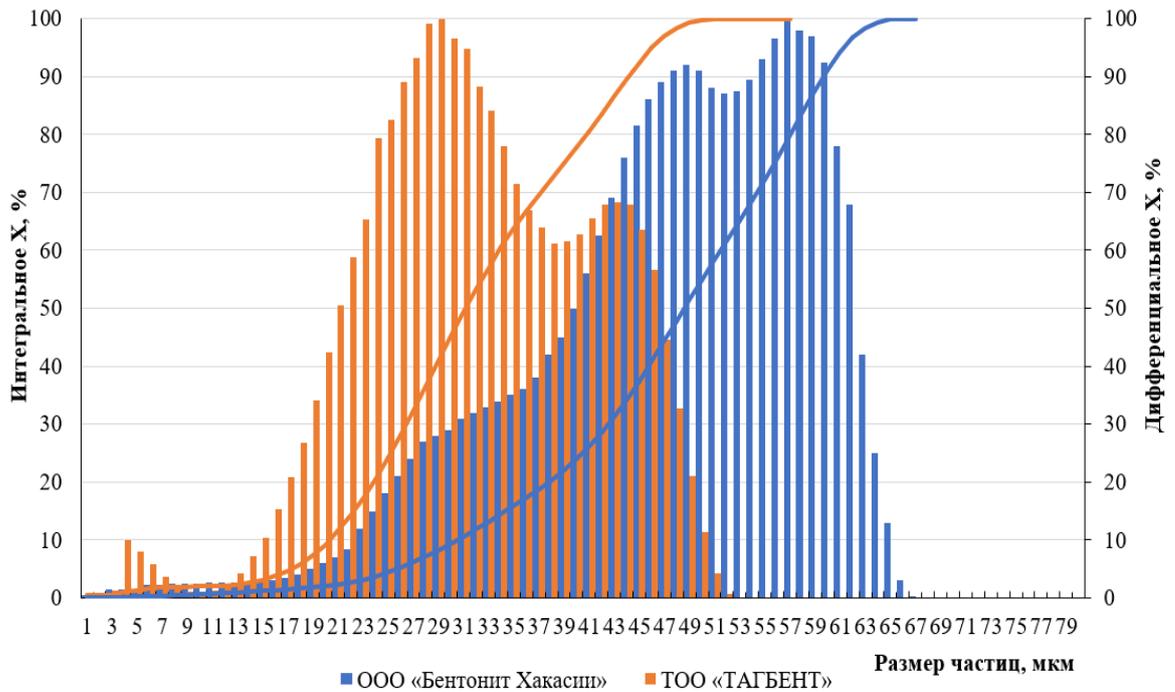


Рисунок 2.1 – Интегральное и дифференциальное распределение частиц бентонитовых глин по размерам

Таблица 2.7 – Химический состав бентонитовых глин

Производитель	Химический состав, %								
	SiO ₂ (своб.)	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	Остальное
ООО «Бентонит Хакасии»	58,07	23,51	4,75	3,97	-	3,61	3,8	0,66	1,63
ТОО «ТАГБЕНТ»	58,87	21,19	3,24	3,02	-	4,17	2,04	0,77	6,70

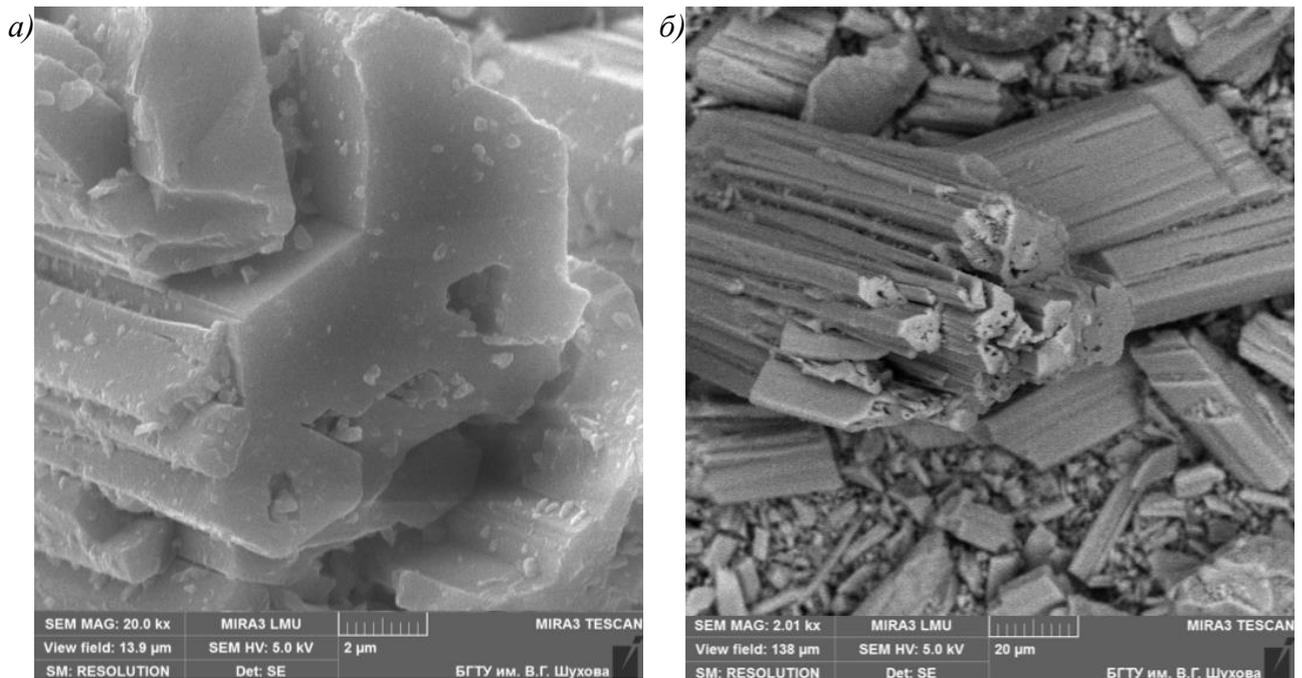


Рисунок 2.2 – Микроструктура бентонитовой глины: а – 10 µm; б – 100 µm

В качестве суперпластификаторов применялись Elocrete и Полипласт СП-1 производства ООО «Полипласт-Юг». Технические характеристики суперпластификаторов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Технические характеристики суперпластификаторов

Показатель	Полипласт СП-1	Elocrete
Состав	Нафталиносulfонат	Поликарбоксилатные эфиры
Форма	Порошок коричневого цвета	Порошок от белого до светло-коричневого цвета
Насыпная плотность, кг/м ³	300-400	300
pH 20% раствора (20°C)	8 ± 1	не более 9

Суперпластификатор Elocrete представляет собой порошковый продукт, получаемый методом распылительной сушки и основанный на модифицированном полиэфиркарбоксилате. Технические характеристики этого материала включают: желтоватую порошковую форму; насыпную плотность в диапазоне от 400 до 600 г/л; максимальные потери при нагревании, составляющие не более 2,0 мас. %; pH раствора 20%-й концентрации при 20 °C варьируется от 6,5 до 8,5 [158]. Этот продукт обладает высокими диспергирующими свойствами, способствует снижению усадки и сохраняет свою эффективность в широком температурном диапазоне.

Суперпластификатор Полипласт СП-1 – представляет собой нафталиносulfонатный суперпластификатор для бетонов и строительных растворов (по химической природе аналогичен разжижителю С-3). Технические характеристики этого материала включают: белую порошковую форму; насыпную плотность в диапазоне от 300 до 400 г/л; максимальные потери при нагревании, составляющие не более 4,0 мас. %. Раствор 20%-й концентрации при 20 °C имеет pH от 8 до 9 [159].

В качестве минеральных добавок для сухих пенобетонных смесей применялись вспученный перлитовый песок и микрокремнезем.

Вспученный перлитовый песок ВПМ, М75 производства ООО «Промперлит» (г. Екатеринбург), соответствующий ГОСТ 10832-2009 [160]. Перлит

представляет собой материал, получаемый в результате вспучивания горных пород вулканического происхождения. В процессе производства перлитового песка мелкая фракция перлита извлекается методом осаждения в очистных аппаратах. Данная фракция состоит из частиц размером от 0,01 до 0,1 мм, а также включает в себя частицы с диаметром менее 0,01 мм [161].

Микрокремнезем конденсированный МК-85 производства ООО «Химпром» (г. Пермь), соответствующий ГОСТ Р 58894-2020 [162]. Микрокремнезем является побочным продуктом производства ферросплавов, образующимся во время выплавки ферросилиция и его сплавов. По гранулометрическому составу средний размер частиц микрокремнезема составляет примерно 0,1 мкм, что в 100 раз меньше среднего размера зерен цемента.

Технические характеристики и химический состав минеральных добавок представлены в таблицах 2.9 и 2.10, гранулометрический состав минеральных добавок – в таблице 2.11.

Таблица 2.9 – Технические характеристики минеральных добавок

Показатель	Ед. изм.	Вспученный перлитовый песок	Микрокремнезем
Марка по насыпной плотности	-	75	85
Насыпная плотность	кг/м ³	60–160	400–600
Истинная плотность	кг/м ³	220–280	2200
Водопотребность	%	25–35	85
Средний размер частиц	мкм	500	0,25
Массовая доля влаги	%	2	0,3
Теплопроводность (25±5°С)	Вт/(м·°С)	0,052	-

Таблица 2.10 – Химический состав минеральных добавок

Минеральная добавка	Химический состав, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	R ₂ O	ППП
Вспученный перлитовый песок	73,87	11,28	0,75	0,52	0,23	1,25	8,6	3,5
Микрокремнезем	94,4	0,57	1,1	-	0,66	0,3	1,52	1,45

Таблица 2.11 – Гранулометрический состав минеральных добавок

Минеральная добавка	Размер сит, мм					Модуль крупности
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
	Частные остатки, %					
Вспученный перлитовый песок	7,20	19,40	18,20	29,60	25,20	1,94
Микрокремнезем	2,10	6,00	1,60	3,20	88,10	0,88

Вода для затворения бетонов соответствует ГОСТ 23732-2011 [163]. Окисленность воды не может быть больше 15 мг/л. Количество органических поверхностно-действующих веществ, сахаров и фенолов, содержащихся в воде не должно быть больше 10 мг/л. Показатель pH не должен быть меньше 4 и более 12,5. Содержание в воде растворимых солей ионов SO_4^{2-} не более 2700 мг/л, Cl^- не более 1200 мг/л, растворимых солей не более 5000 мг/л.

Все материалы удовлетворяют требованиям соответствующих нормативных документов.

2.2. Методы исследований

2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов

Для изучения химического и минерального состава и микроструктуры исходных компонентов и полученных материалов применялись методы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии.

С целью изучения фракционного состава исследуемых материалов применялся аппарат MicroSizer 201 (рисунок 2.3). Устройство MicroSizer 201 предоставляет возможность исследовать частицы размерами 0,2-600 мкм, разбивая на 4 десятка фракций диапазон измерения.

Изучение микроструктуры полученных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3LMU (рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 – Лазерный анализатор частиц – MicroSizer 201



Рисунок 2.4 – Микроскоп TESCAN MIRA 3LMU

TESCAN MIRA представляет собой сканирующий электронный микроскоп четвертого поколения, оснащенный катодом Шоттки, который позволяет одновременно получать изображения методом СЭМ и проводить анализ элементного состава в реальном времени через универсальное программное обеспечение TESCAN Essence. Это существенно упрощает процесс сбора данных о морфологии поверхности анализируемого образца и его локальном элементном составе, делая TESCAN MIRA эффективным инструментом для мониторинга качества материалов и изделий, анализа неисправностей и выполнения разнообразных лабораторных исследований. Современная колонна микроскопа TESCAN MIRA оснащена усовершенствованной электроникой, позволяющей мгновенно переключаться между режимом формирования изображений при высоких увеличениях и режимом анализа элементного состава образцов без необходимости механической перестановки апертур или настройки элементов внутри колонны.



Рисунок 2.5 – Рентгено-флуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation

Минеральный состав исходного сырья и затвердевшего цементного камня определялся с помощью рентгенофазового анализа (РФА). Сущность метода заключается в фиксации прибором дифракционной картины, и последующего сопоставления полученных отражений с определенными параметрами структуры кристаллических фаз. РФА исследуемых проб проводили на рентгено-флуоресцентном спектрометре ARL 9900 Work Station (рисунок 2.5) со встроенной системой дифракции, с применением трубки с Cu-анодом.

Измельчение материалов производилось на трех видах помольных агрегатов: вибрационная мельница МВ-20 [164], вихревая струйная мельница ВСМ-01 [165], роторно-шаровая мельница «РШМ МИКРОН» [166].

Вибрационная мельница МВ-20 является измельчительным устройством, предназначенным для эффективного тонкого помола различной категории

материалов, включая минералы, порошковые вещества и другие твердые агрегаты. Принцип ее работы основан на вибрационной технологии дробления и измельчения, которая реализуется посредством вращения цилиндров или чаш мельницы. Эти компоненты создают интенсивные вибрационные колебания, обеспечивающие разрушение частиц материала между собой и стенками самой мельницы.

Вихревая струйная мельница ВСМ-01 – это высокоэффективное оборудование, предназначенное для сверхтонкого измельчения различных материалов, включая порошки и мелкозернистые агрегаты. Принцип работы основан на технологии вихревой струйной обработки, при которой материал подвергается воздействию интенсивных вихревых потоков воздуха высокого давления. Эти струи способствуют разрушению частиц материала за счет их столкновений друг с другом и с элементами мельницы. В мельнице ВСМ-01 используется циклонный принцип разделения измельченного материала, что позволяет эффективно разделять частицы по размеру и обеспечивать получение продукта с высокой дисперсностью.

Роторно-шаровая мельница «РШМ-МИКРОН» характеризуется горизонтальным расположением рабочей камеры, которая может быть футерована высокопрочной сталью, керамическими материалами или полиуретаном для повышения износостойкости. Внутри камеры размещены мелющие тела, представляющие собой стальные или керамические шары, которые приводятся в движение двумя роторами разной скорости: среднескоростным для предварительного грубого измельчения и высокоскоростным для тонкого помола. В процессе работы материал, подаваемый через верхний загрузочный люк, захватывается движущейся мелющей загрузкой и подвергается интенсивной обработке путем истирания, удара и сдвига между мелющими телами, что обеспечивает эффективное измельчение до требуемого уровня дисперсности.

Технические характеристики помольных агрегатов представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Технические характеристики помольных агрегатов

Показатель	Помольные агрегаты		
	МВ-20	ВСМ-01	РШМ-МИКРОН
Размер частиц на входе в мельницу, мм	до 3	до 20	до 3
Средний размер получаемых частиц при сухом помоле, мкм	10	50	1-2
Средняя удельная поверхность сырья после помола, см ² /г	7000	3000	14000
Возможность мокрого помола	да	нет	да
Максимальная производительность агрегата, т/ч	0,1-1	0,5-3	0,1-15
Установленная мощность, кВт	45	45	56
Производительность при одинаковом домоле цемента (в 2 раза), кг/ч	350	500	3200
Расход э/энергии на тонну помола, кВт/т	128	90	18,6

Кратность (выход пены) – это отношение объема пены к исходному объему раствора пенообразователя. Она вычисляется по формуле:

$$K_n = V_n / V_{no}, \quad (2.1)$$

где K_n – кратность пены; V_n – объем пены; V_{no} – объем пенообразователя.

Кратность пены для поризованных легких бетонов должна быть не меньше 6-10, с целью получения конструкционно-теплоизоляционных бетонов – 10-20 и 15-40 для теплоизоляционных бетонов [167].

Для развития стабильной пенобетонной структуры должно осуществляться определенное требование соответствия объемных фаз φ :

$$\varphi = V_m / V_{ж}, \quad (2.2)$$

где V_m – объем твердой фазы в смеси; $V_{ж}$ – объем жидкой фазы в смеси.

Исследования выполнялись в соответствии с методологией, предложенной в [168], которая подразумевает следующую последовательность действий: сначала отмеривается точный объем раствора пенообразователя (100 мл) и переливается в мерную емкость для смешивания. Далее эта смесь подвергается перемешиванию с помощью лабораторного миксера, работающего на скорости 250 оборотов в минуту, в течение 3 мин. В ходе этого процесса происходит образование и накопление высококонцентрированной пены из раствора пенообразователя. После завершения перемешивания пенная жидкость аккуратно переливается в

узкогорлый мерный цилиндр емкостью 500 см³. На протяжении определенных временных интервалов проводились тщательные измерения высоты столба пены и объема жидкости, вытекающей из пены при ее разрушении. Первоначальный объем пены, измеренный сразу после перемешивания (нулевая точка во времени), использовался в качестве основы для расчета кратности пены.

Влажность бентонитовых глин определяли по ГОСТ 3594.11-93 [169]. Метод определения влаги порошкообразных глин. От партии отобрали навеску порошкообразной глины массой 20 г, поместили в предварительно высушенную до постоянной массы и взвешенную чашу и сушили в сушильном шкафу при температуре 106 °С в течение 30 мин до постоянной массы. Чашу с навеской взвешиваем. Затем дополнительно сушили в течение 15 мин и снова взвешивали. Операцию повторяли до тех пор, пока разность результатов двух последних взвешиваний стала не более 0,02 г. Чашу с порошкообразной глиной, высушенной до постоянной массы, охлаждали и взвешивали.

Массовая доля влаги X в процентах определяется по формуле:

$$X = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100, \quad (2.3)$$

где m – масса навески глины до высушивания, г; m_1 – масса навески глины после высушивания, г.

Определение **нормальной густоты и сроков схватывания** цементного теста производилось с использованием прибора Вика в соответствии с требованиями ГОСТ 310.3-76 [170]. Цементное тесто вымешивалось вручную. Конус прибора устанавливался на стеклянной поверхности, под который размещался круг с концентрическими окружностями, расположенными с интервалом в 5 мм. Регулируемые болты, служащие одновременно опорами прибора, использовались для выравнивания круга со стеклом в горизонтальном положении.

Для оценки **растекаемости** готовили 250 см³ растворной смеси, которую заливали в конус до верхнего кольца. Конус плавно поднимался вертикально, что

приводило к растеканию пенобетонной смеси по стеклу. По концентрическим окружностям в перпендикулярных направлениях определялись максимальный и минимальный диаметры образовавшегося расплыва, а по ним рассчитывался средний диаметр, служащий характеристикой растекаемости пенобетонной смеси.

Влажность смеси определяли по пунктам 4 и 5 ГОСТ 12730.2-2020 [171].

2.2.2. Методы исследования физико-механических характеристик теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Сухая пенобетонная смесь для проведения экспериментальных исследований приготавливалась в условиях лаборатории кафедры строительства и городского хозяйства. Составы пенобетона определены с использованием разработанной программы расчета состава теплоизоляционного пенобетона (приложение А) [172].

Основные физико-механические характеристики пенобетонных образцов определялись согласно ГОСТ 25485-2019 [173]. Перед испытанием производилось определение геометрических размеров образцов с точностью до 1 мм.

Определение **плотности пенобетонной смеси** осуществлялось с использованием мерных цилиндров объемом от 250 до 2000 мл. Сначала проводился взвес чистого и сухого цилиндра на технических весах с точностью до 0,01 г для определения его пустого веса. Далее пенобетонная смесь заливалась в цилиндр, после чего проводился повторный взвес цилиндра с заполненной смесью на тех же весах с той же точностью. Плотность пенобетонной смеси рассчитывалась на основе полученных данных по формуле:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.4)$$

где m_1 – масса пустого цилиндра, кг; m_2 – масса цилиндра с пенобетонной смесью, кг; V – объем цилиндра, дм^3 .

Среднюю плотность пенобетонных образцов определяли в соответствии с ГОСТ 12852.0-2020 [174] и ГОСТ 27005-2014 [175]. Использовались

предварительно высушенные образцы, выдержанные при температуре 105 ± 5 °С, с размерами куба $[(100 \times 100 \times 100) \pm 1]$ мм. Отобранные для анализа образцы взвешивались с точностью не менее 99,5% массы. Далее проводилось измерение размеров каждого образца – длины, ширины и толщины – с последующим расчетом его объема. Полученные данные использовались для вычисления средней плотности пенобетона.

Среднюю плотность пенобетона, кг/м^3 , в состоянии естественной влажности определяли по формуле:

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{m_{\text{в}}}{V}, \quad (2.5)$$

где $m_{\text{в}}$ – масса образца в состоянии естественной влажности, кг; V – объем образца, м^3 .

Среднюю плотность пенобетона в сухом состоянии (марку по средней плотности) вычисляли по формуле:

$$\gamma_{\text{сух}} = \frac{\gamma_{\text{вл}}}{(1+0,01W)}, \quad (2.6)$$

где $\gamma_{\text{вл}}$ – средняя плотность пенобетона в состоянии естественной влажности, кг/м^3 ; W – влажность пенобетона, %.



Рисунок 2.6 – Общий вид машин МИФ – 600.1.2.С

Предел прочности при сжатии определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [176] на испытательной машине МИФ – 600.1.2.С (рисунок 2.6).

Образцы пенобетона извлекались из массивов пенобетона на разных уровнях: с поверхности, из центральной части и с нижней стороны. В испытаниях участвовали серии по три образца каждого размером $100 \times 100 \times 100$ мм.

Предел прочности при сжатии, МПа, определяли по формуле:

$$R_{\text{сж}} = \frac{\alpha k F}{S}, \quad (2.7)$$

где α – масштабный коэффициент; k – поправочный коэффициент, учитывающий влажность пенобетона в момент испытаний; F – разрушающая нагрузка, Н; S – площадь рабочего сечения образца, мм².

Согласно требованиям ГОСТ 10180-2012 [176], для ячеистого бетона с средней плотностью 400 кг/м³ и выше поправочный коэффициент α для поперечных образцов размером 100×100×100 мм принимается равным 0,95. Коэффициент коррекции, учитывающий текущую влажность ячеистого бетона на момент испытаний, принимается за 1,0, что соответствует ячеистому бетону с содержанием влаги 10% от массы.

Водопоглощение определялось по методике ГОСТ 12730.3-2020 [177]. Согласно требованиям ГОСТ 23732-2011 [163], образцы помещаются в емкость, заполненную водой таким образом, чтобы уровень воды превышал верхний край образцов примерно на 50 мм. Образцы укладываются на прокладки, чтобы минимально поддерживать их положение (призмы и цилиндры укладываются на боковую поверхность). Температура воды в контейнере должна находиться в диапазоне (20 ±2) °С.

Взвешивание образцов осуществляется через каждые 24 ч процесса водопоглощения с использованием обычных или гидростатических весов, обеспечивая точность измерения не ниже 99,9%. При взвешивании на обычных весах образцы, извлеченные из воды, предварительно протираются отжатой влажной тканью для удаления избыточной влаги. Масса воды, высвобождающаяся из пор образца на чашку весов, включается в массу насыщенного образца. Методика испытаний продолжается до тех пор, пока различия между результатами двух последовательных взвешиваний не будут составлять менее 0,1%.

Расчет водопоглощения образцов при полном погружении в процентах по объему осуществлялся по формуле

$$W_M = \frac{m_c - m_b}{m_c} \times 100, \quad (2.8)$$

где m_c – масса сухого образца, г; m_g – масса высушенного образца, г.

Морозостойкость пенобетона определялась в соответствии с ГОСТ 25485-2019 [173]. Для оценки морозостойкости были отобраны 24 образца-куба размером $100 \times 100 \times 100$ мм из каждой серии. Насыщение образцов водой осуществлялось в три этапа: сначала они погружались на $1/3$ высоты и выдерживались 8 ч; затем на $2/3$ высоты, также на 8 ч; и, наконец, полностью погружались на 24 ч.

Основные образцы, подготовленные для определения потери прочности и массы после циклов замораживания и оттаивания, изначально взвешивались и затем помещались в морозильную камеру при температуре -18 °С. Продолжительность одного цикла замораживания составляла 4 ч, после чего образцы извлекались и перемещались в камеру для оттаивания с температурой, соответствующей комнатной, и относительной влажностью 90 % на срок 18 ч. Осмотр образцов и испытания на сжатие проводились после каждого пятого цикла переменного замораживания и оттаивания в диапазоне температур $\pm(18 \pm 2)$ °С.

Серия бетонных образцов соответствовала установленным требованиям, если относительное снижение прочности на сжатие после определенного количества циклов не превышало 15 %, а относительная потеря массы – 5 %.

Коэффициент **паропроницаемости** пенобетона определяли по ГОСТ 25898-2020 [178] на образцах пенобетона размерами $100 \times 100 \times 30$ мм, выпиленных из пенобетонного массива.

Определение усадки образцов пенобетона проводилось по ГОСТ 25485 [173] при высыхании образцов в течение длительного времени в естественных условиях, что позволяет более полно представить сложную динамику изменений усадочных деформаций ячеистого бетона в условиях, приближенным к реальным.

Усадочные деформации пенобетона определялись испытанием трех образцов-призм размером $40 \times 40 \times 160$ мм. Образцы выпиливали из контрольного ячеистобетонного блока размерами в соответствии с требованиями ГОСТ 25485-2019 [173]. До испытания образцы хранились в закрытых эксикаторах над водой.



Рисунок 2.7 – Прибор для измерения теплопроводности ИТП-МГ4 «100»

Теплопроводность определялась с

использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 «100» (рисунок 2.7), который работает в соответствии с ГОСТ 7076-99 [179]. Принцип функционирования прибора заключается в создании стационарного теплового потока, который проходит через плоский образец заданной толщины, перпендикулярно его лицевым граням. В процессе измерений фиксируются толщина образца, плотность теплового потока и температуры на противоположных гранях образца.

Испытания проводились в следующем порядке. Для обеспечения точности результатов были изготовлены три образца в форме прямоугольных параллелепипедов, большие грани которых представляли собой квадраты со стороной 100×100 мм (специально для прибора ИТП-МГ4 «100»). Толщина образца (H) и разница температур между нагревателем и холодильником (ΔT) выбирались в соответствии с рекомендациями, изложенными в приложении руководства по эксплуатации прибора, учитывая предполагаемую теплопроводность материала.

2.2.3. Методы исследования макропористой структуры теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Определение поверхностной пористости осуществлялось по авторскому способу определения пористости ячеистых бетонов (приложение Б) [180].

Данный способ позволяет получать цифровые изображения шлифов пористого бетона с четким разделением пор и межпоровых перегородок, не требуя предварительной прокраски лицевой поверхности.

Это достигается за счет использования освещения, направленного под острым углом к поверхности материала. Со стороны падения света на месте объекта образуется затененный участок, который четко разграничивает объект и фон, что значительно упрощает последующую идентификацию границ [181].

Определение общей поверхностной пористости, среднего диаметра и общего количества пор осуществлялось с использованием авторской программы расчета параметров пористости ячеистых бетонов, разработанной на кафедре строительства и городского хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова (приложение В) [182].

Программа представляет собой инструмент для анализа изображений, предназначенный для определения и измерения характеристик пор на поверхности материала. Она использует методы компьютерного зрения, машинного обучения и математической обработки данных для выполнения поставленной задачи. Входными данными являются изображение, а также его физические размеры в миллиметрах, что позволяет проводить анализ с учетом реальных масштабов. Программа состоит из нескольких этапов, каждый из которых выполняет определенную функцию для достижения конечного результата.

На первом этапе программа загружает изображение в градациях серого с использованием библиотеки OpenCV. Это позволяет упростить дальнейшую обработку, так как работа с одноканальным изображением требует меньших вычислительных ресурсов. После загрузки определяются размеры изображения в пикселях, что необходимо для последующих расчетов. На основе введенных пользователем физических размеров изображения (высота и ширина в миллиметрах) программа вычисляет коэффициент конверсии, который определяет соотношение между пикселями и миллиметрами. Это позволяет переводить все измерения из пиксельных единиц в физические, что делает результаты анализа более информативными и применимыми на практике.

Следующим шагом является бинаризация изображения с использованием метода Оцу. Этот метод автоматически определяет оптимальный порог для разделения пикселей на два класса: фоновые (черные) и объекты (белые). Бинаризация необходима для выделения областей интереса, в данном случае – пор. После этого программа применяет алгоритм кластеризации K-means для разделения пикселей изображения на пять кластеров. Это позволяет оценить распределение интенсивности пикселей и определить процентное соотношение

пикселей в каждом кластере. Кластеризация выполняется с использованием библиотеки `scikit-learn`, а результаты представляются в виде процентного соотношения и средних значений интенсивности для каждого кластера.

Для нахождения пор программа использует метод поиска контуров, реализованный в библиотеке `scikit-image`. Контуров представляют собой границы объектов, которые могут быть аппроксимированы эллипсами с помощью функции `cv2.fitEllipse`. Это позволяет определить форму и размеры пор. Для каждого найденного эллипса рассчитываются диаметр и площадь в пикселях, которые затем конвертируются в миллиметры с использованием ранее вычисленного коэффициента конверсии. На основе этих данных программа вычисляет средний диаметр и среднюю площадь пор, что дает общее представление о характеристиках поверхности.

Для более детального анализа программа строит гистограммы распределения диаметров и площадей пор. Гистограммы создаются путем разделения диапазонов значений на интервалы (бины) и подсчета количества пор, попадающих в каждый интервал. Это позволяет визуализировать распределение размеров пор и выявить возможные закономерности. Результаты анализа выводятся в текстовом виде, включая процентное соотношение пикселей в кластерах, общее количество пор, средний диаметр и среднюю площадь пор, а также данные для построения гистограмм.

На заключительном этапе программа визуализирует результаты анализа, накладывая найденные эллипсы на исходное изображение. Это позволяет пользователю наглядно оценить расположение и форму пор. Визуализация выполняется с использованием библиотеки `OpenCV`, а результаты отображаются в отдельном окне.

Определение фрактальной размерности пористой структуры лабораторных образцов определялось с использованием авторской программы расчета фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов (приложение Г) [183].

Первоначально программа загружает изображение по указанному пути и преобразует его в черно-белое (бинаризованное) состояние с помощью соответствующих алгоритмов обработки изображений. Это преобразование позволяет упростить последующую обработку, поскольку оно сводит весь диапазон цветов к бинарному представлению, где каждый пиксель имеет значение либо 0 (черный), либо 255 (белый), но в дальнейшем этот диапазон не используется напрямую.

После загрузки и преобразования в черно-белое состояние программа применяет метод Оцу для бинаризации изображения. Метод Оцу автоматически определяет оптимальный порог на основе распределения яркостей пикселей, превращая изображение в бинарное состояние, где все пиксели имеют значение либо 0 (черный), либо 1 (белый).

После бинаризации программа находит контуры объектов на изображении. Контур каждой области определяется и преобразуется в отдельные пиксели на новом изображении, где только контуры имеют значение 1, а остальная часть остается равной 0. Этот подход позволяет рассчитать основные метрики контуров объектов.

Обычно, для анализа сложных структур важно вычислить их фрактальную размерность. С этой целью программа использует метод подсчета ячеек. Этот метод включает в себя последовательное деление изображения на более мелкие ячейки разных размеров и подсчет количества ячеек, содержащих часть контура объектов. Варианты размеров ячеек могут варьироваться, что позволяет оценить масштабную инвариантность структуры. После подсчета ячеек для каждого размера ячейки, программа проводит линейную регрессию логарифмических значений количества ячеек и логарифмических значений размеров ячеек. Наклон линии регрессии определяет фрактальную размерность структуры.

Кроме фрактальной размерности программа также рассчитывает свойства пор. Для оценки размеров пор используется подход, который идентифицирует отдельные объекты (поры) на бинаризованном изображении. Затем вычисляется их эквивалентный диаметр и площадь в миллиметрах, используя общую

размерность пикселей, и находит средние значения для этих свойств, что позволяет получить количественную информацию о размерах пор в изучаемой структуре.

Наконец, программа выводит результаты расчетов, включая средний диаметр и площадь пор, фрактальную размерность, а также строит график, демонстрирующий логарифмическую зависимость количества ячеек от их размера. Этот график позволяет визуализировать связь между масштабом и фрактальной размерностью объектов на изображении. График строится путем отображения логарифмических значений количества ячеек в зависимости от логарифмических значений размеров ячеек, что дает возможность оценить сложность и масштабную инвариантность структуры.

2.3. Выводы

1. Исследование сырья для анализа его пригодности в производстве сухих пенобетонных смесей проводилось с помощью широкого спектра современных стандартизированных методов и высокоточного оборудования. Все исследования велись в строгом соответствии с общепринятыми стандартами, что позволило определить эффективность использования минерального сырья с высокой точностью.

2. Методика исследования основана на достижениях фундаментальных и прикладных работ как отечественных, так и зарубежных ученых в области наполнения пенополиуретанов. Применялся комплекс современных методов с использованием высокотехнологичного оборудования для всестороннего изучения сырья, включая такие методы, как рентгенофлуоресценция и сканирующая электронная микроскопия. При определении свойств готовых образцов использовались нормативные документы для обеспечения стандартных показателей.

3. Для разработки сухих пенобетонных смесей проведено изучение физико-механических и минералогических свойств исследуемых материалов. При этом использовались современные методы и оборудование в полном соответствии с

требованиями нормативных документов, что позволило получить достоверные и обоснованные результаты.

4. Определение общей поверхностной пористости, среднего диаметра и общего количества пор осуществлялось с использованием авторской программы расчета параметров пористости ячеистых бетонов. Значение фрактальной размерности пористой структуры лабораторных образцов определялось с использованием авторской программы расчета фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов.

3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ СУХИХ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

3.1. Оценка эффективности пенообразователей различной природы

Ключевым аспектом при производстве пенобетонных композиций по одностадийной технологии является изучение взаимодействия пенообразующих агентов, различающихся по химической природе (синтетические или биологические), с вяжущим компонентом, а также их совместимость с другими модифицирующими добавками. Анализ научной литературы свидетельствует о том, что, несмотря на значительное количество проведенных исследований, механизмы структурообразования в цементных пенобетонах, полученных по одностадийной технологии с применением пенообразователей различной химической природы, остаются недостаточно изученными. В связи с этим выявление ключевых закономерностей влияния химической природы пенообразователя на процессы формирования пенной структуры позволит установить научно обоснованные критерии для его выбора.

Пенообразующий агент оказывает комплексное влияние на качественные характеристики пенобетона [184]. С одной стороны, он обеспечивает формирование заданной пористой структуры материала и регулирует его среднюю плотность. С другой стороны, введение пенообразователя может ингибировать процессы гидратации и твердения вяжущего, вызывать частичную деструкцию цементной матрицы и снижать прочностные характеристики конечного продукта. В связи с этим в технологии производства пенобетона особую актуальность приобретает задача оптимизации выбора типа пенообразующего агента и определения его рациональной дозировки.

Объем воздушных пор, формируемых пеной, составляет 60-90% от общего объема пенобетонного изделия. Следовательно, функциональные характеристики пенообразователя и свойства образующейся пенной структуры являются одним из ключевых факторов, определяющих как технологические параметры производства, так и эксплуатационные свойства готового материала.

Перевод пенообразователя в сухое состояние производился гидратационным методом, описанном в [185, 186].

Процесс перевода жидкого пенообразующего состава в сухую форму представляет собой технологически управляемую операцию, основанную на принципах физико-химической адсорбции и контролируемой дегидратации. Исходным сырьем выступает водный раствор (или его концентрат) синтетического (ПО-6НП) или белкового (Эталон) пенообразователя, который трансформируется в твердую фазу посредством инкорпорации гидроизоляционной добавки, выполняющей функцию водопоглощающего агента. Процесс начинается с гомогенизации компонентов: пенообразователь смешивается с гидроизоляционной добавкой в массовом соотношении 1 : 2, что обеспечивает эффективную абсорбцию свободной воды за счет синергии капиллярных сил и гидрофобных свойств добавки. В ходе данного этапа формируется устойчивая твердая матрица, структура которой стабилизируется за счет заполнения межчастичного пространства адсорбированной жидкостью [186].

При необходимости интенсификации дегидратации композиция подвергается термической обработке при температурах 40-80°C, что позволяет достичь оптимальной остаточной влажности (менее 5%) и минимизировать гигроскопичность конечного продукта. Важным аспектом метода является использование гидроизоляционной добавки, которая не только аккумулирует влагу, но и придает смеси водостойкость, предотвращая спонтанную гидратацию пенообразователя при контакте с атмосферной влагой. В отличие от альтернативных вариантов (карбонатные добавки – мел, известняк, доломит; гидратирующие компоненты – негашеная известь, гипс), гидроизоляционная добавка обеспечивает более стабильные реологические характеристики сухого продукта без необходимости коррекции рецептуры для сохранения кинетики порообразования [185].

Показатели кратности и стабильности полученных пен из рассматриваемых пенообразователей представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

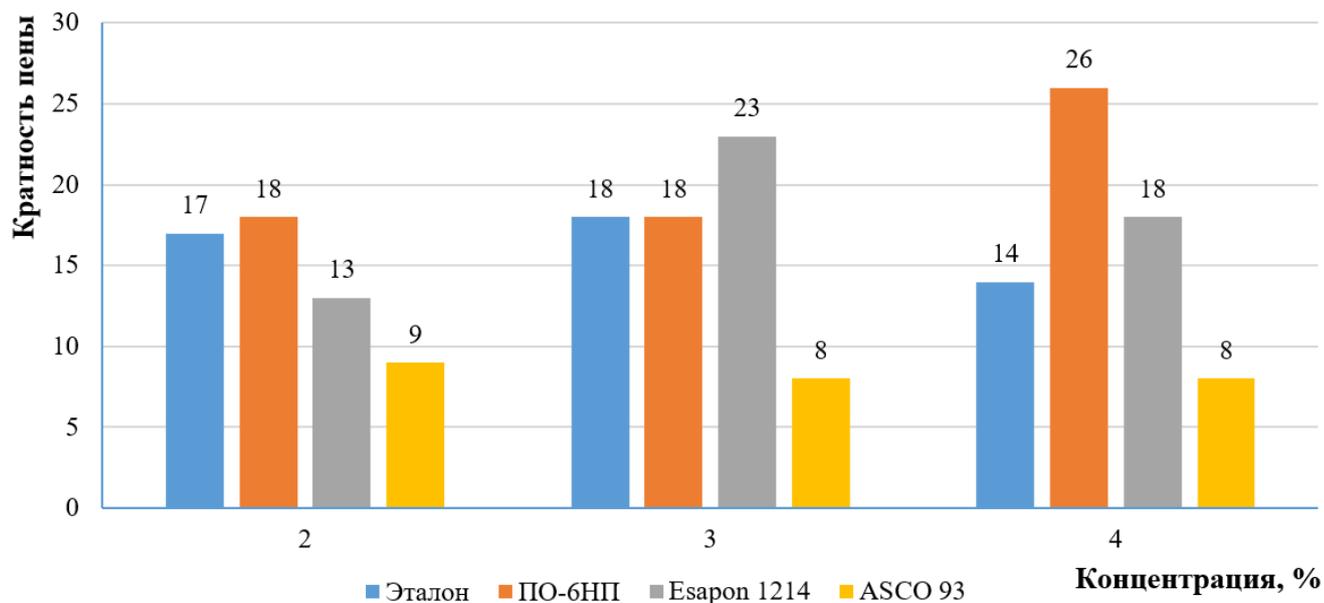


Рисунок 3.1 – Зависимость кратности пены от концентрации пенообразователя

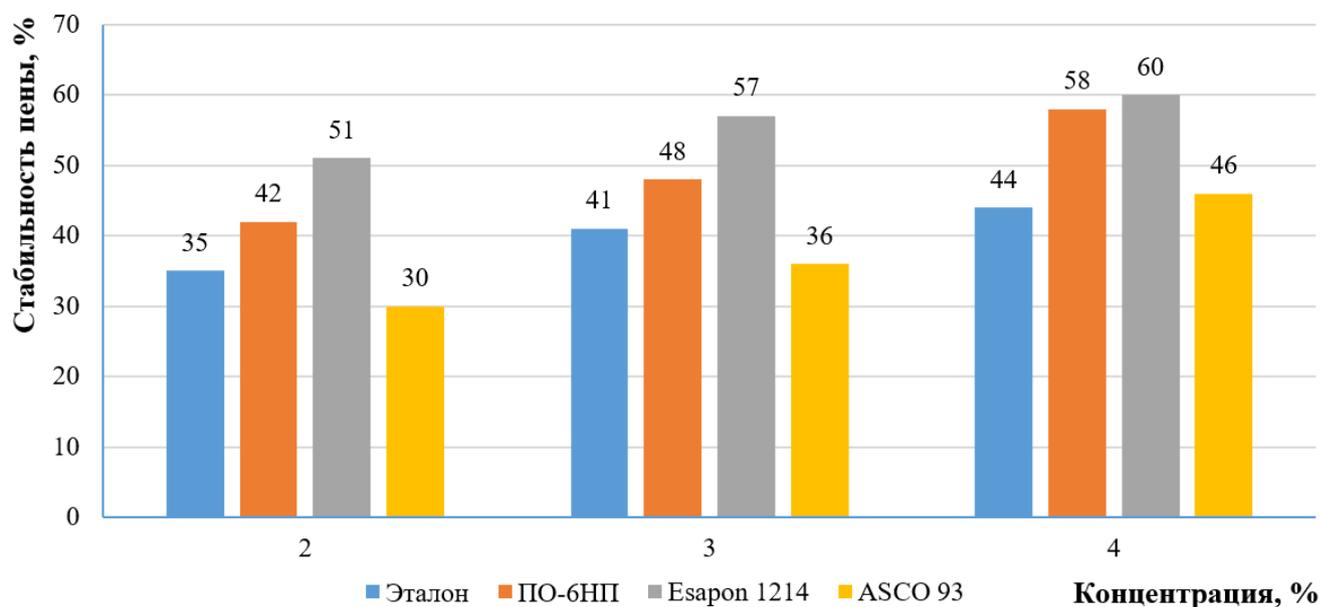


Рисунок 3.2 – Зависимость стабильности пены от концентрации пенообразователя

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что пена, сформированная из 2%-го раствора белкового пенообразователя Эталон, обладает меньшей кратностью по сравнению с синтетическим аналогом ПО-6НП, однако демонстрирует более высокие показатели стабильности. Увеличение концентрации раствора ПО-6НП до 4% приводит к значительному улучшению как кратности пены, так и ее устойчивости.

Аналогичные исследования для порообразователей Esapon 1214 и ASCO 93 выявили следующие закономерности. Порообразователь Esapon 1214

демонстрирует нелинейную зависимость кратности пены от концентрации: при 2%-й концентрации кратность составляет 13, при увеличении до 3% наблюдается значительный рост до 23, однако дальнейшее повышение концентрации до 4% приводит к снижению кратности до 18. При этом стабильность пены для Esaron 1214 увеличивается с ростом концентрации: от 51% при 2%-й до 60% при 4%-й, что делает его одним из наиболее устойчивых пенообразователей.

Для порообразователя ASCO 93 характерны стабильно низкие значения кратности пены, которые варьируются в пределах 8-9% на всех уровнях концентрации (2, 3 и 4%). Однако стабильность пены для ASCO 93 увеличивается с ростом концентрации: от 42% при 2%-й до 58% при 4%-й, что свидетельствует о его способности формировать устойчивую, но менее объемную пенную структуру.

Процесс образования пенной структуры можно описать через ориентацию гидрофильных компонентов ПАВ в сторону жидкой фазы, в то время как гидрофобные группы направлены в газовую среду. Повышение давления газа усиливает уплотняющее воздействие на поровые перегородки, что способствует увеличению прочности пенной матрицы [187]. Для расширения площади межфазной поверхности требуется определенная энергия перемешивания. В случае синтетических пенообразователей, которые существенно снижают поверхностное натяжение, эта энергия минимальна. Это обеспечивает синтетическим пенообразователям более высокую пенообразующую способность по сравнению с высокомолекулярными аналогами, а также позволяет стабилизировать межфазную границу при меньшей концентрации ПАВ и за более короткое время. Однако низкое поверхностное натяжение затрудняет удержание воздушных пузырьков, что негативно сказывается на устойчивости пены, полученной на основе синтетических пенообразователей.

Для белковых пенообразователей характерно незначительное снижение поверхностного натяжения – порядка 10-15% [188]. Это усложняет процесс вовлечения воздуха, но способствует более эффективному удержанию пузырьков

благодаря повышенной свободной энергии Гельмгольца. В результате давление внутри пузырьков возрастает, что обеспечивает повышенную прочность белкового пенного каркаса по сравнению с синтетическими пенообразователями.

Порообразователь Esapon 1214 демонстрирует высокую стабильность пены на всех уровнях концентрации, что делает его привлекательным для применения в условиях, где требуется долговечность пенной структуры. В то же время ASCO 93 показывает низкую кратность, но достаточно высокую стабильность, особенно при повышенных концентрациях, что может быть полезно в специфических технологических процессах.

На основании проведенного анализа для дальнейших исследований пенной составляющей были выбраны: белковый Эталон и Esapon 1214 с концентрацией 3% и синтетический ПО-6НП с концентрацией 4%. Такой выбор обусловлен необходимостью изучения влияния химической природы пенообразователей и их концентрации на ключевые параметры пены, включая кратность, стабильность и механическую прочность пенной структуры.

3.2. Влияние модификаторов на кратность и стабильность пен

Параметры стабильности, определенные в лабораторных условиях для изолированных пен, не полностью отражают их поведение в гетерогенной системе, содержащей минеральные вяжущие, заполнители и функциональные присадки. В процессе смешивания сухих компонентов с водой пена подвергается комплексным воздействиям: механическому напряжению при перемешивании, ионному обмену с цементным раствором, а также термодинамической нестабильности, вызванной экзотермией гидратации. Эти факторы индуцируют коалесценцию газовых пузырьков, седиментацию межпузырьковой жидкости и десорбцию поверхностно-активных веществ, что приводит к деградации пористой структуры на этапе формования. Исходя из этого проводилось определение оптимального содержания стабилизаторов пены, при котором наблюдалась наибольшая кратность и стабильность свойств пены.

В качестве стабилизатора пены применялась бентонитовая глина с долей монтмориллонита не менее 85% компании ООО «Бентонит Хакасии» (далее – бентонит 1) и бентонитовая глина компании ТОО «ТАГБЕНТ» (далее – бентонит 2) с долей монтмориллонита не менее 85%, истинной влажностью – 4,48-5,74%, истинной плотностью – 2,022-2,111 г/см³.

Для повышения технических характеристик порообразователя Esaron 1214 с концентрацией 3% и пенообразователей Эталон с концентрацией 3% и ПО-6НП с концентрацией 4% проведены исследования влияния кратности пены и количества выделившейся жидкости за 30 мин от процентного содержания стабилизатора пены – бентонитовой глины.

Зависимость кратности пены от процентного содержания добавки стабилизатора представлена на рисунке 3.3.

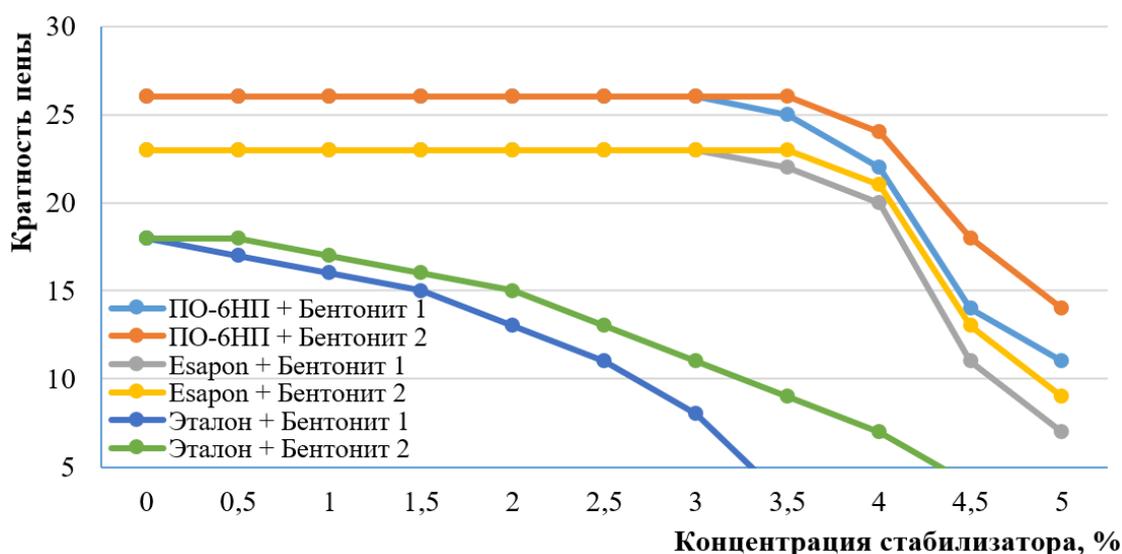


Рисунок 3.3 – Зависимость стабильности пены от концентрации стабилизатора

Превышение концентрации минерального порошка в составе композиции свыше 4 мас. % приводит к снижению кратности технической пены, что может быть обусловлено процессами хемосорбции между активными функциональными группами ПАВ и реакционными центрами на поверхности минеральных частиц. Данное взаимодействие провоцирует модификацию поверхностного натяжения на границе газ-жидкость, усиливая коалесценцию воздушных пузырьков и дестабилизацию пенной структуры.

Зависимость выделения воды из пены от процентного содержания добавки стабилизатора показана на рисунке 3.4.

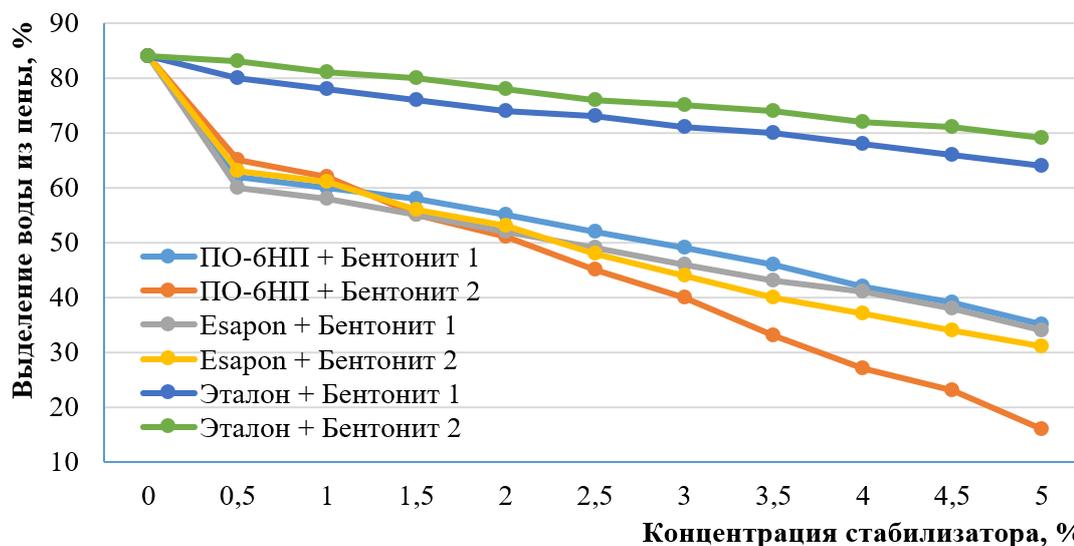


Рисунок 3.4 – Зависимость выделения воды из пены от концентрации стабилизатора

Ограниченная эффективность исследуемых стабилизаторов в составе анионных ПАВ-систем (на примере водного раствора ПО-6НП с функциональными модификаторами) связана с особенностями межмолекулярных взаимодействий. В частности, при введении 3 мас. % минерального порошка достигается снижение водоотделения до 33,4% без изменения кратности пены. Механизм стабилизации обусловлен двумя факторами: барьерным эффектом тонкодисперсных частиц, минимизирующих дренаж жидкости из межпузырьковых пленок за счет блокировки границ Плато и структурообразованием в результате ускоренной кинетики схватывания, переводящего жидкостную фазу в псевдотвердое состояние.

Белковые пенообразователи формируют жесткие адсорбционные слои за счет протеиновых макромолекул, создающих стерический барьер. Введение бентонита, обладающего высокой ионообменной способностью, приводит к частичной денатурации белков и десорбции их с межфазной границы. Кроме того, электростатические взаимодействия между положительно заряженными аминогруппами белков и отрицательно заряженными слоями бентонита провоцируют агрегацию частиц, нарушая однородность пенной структуры и увеличивая дренаж жидкости. Это ограничивает синергетический эффект и

требует поиска альтернативных стабилизаторов, совместимых с протеиновыми системами [189].

Экспериментально установлена оптимальная концентрация пенообразователя ПО-6НП (3%), обеспечивающая максимальную кратность пены. Бентонитовая глина ТОО «ТАГБЕНТ» в дозировке до 3 мас. % подтвердила свою эффективность как стабилизатор, снижая водоотделение до 33,4% при сохранении кратности 23. Однако применение бентонитовых глин в комбинации с белковыми пенообразователями демонстрирует сниженную эффективность, что связано с конфликтом механизмов стабилизации.

3.3. Подбор минеральных добавок

Введение минеральных добавок в состав сухих пенобетонных смесей является ключевым инструментом модификации их структурно-функциональных характеристик. Выбор добавок, таких как вспученный перлитовый песок (далее – перлит) и микрокремнезем, обусловлен их способностью влиять на процессы гидратации, формирование пористой архитектоники и механические свойства конечного композита. Каждый из этих материалов обладает уникальными физико-химическими свойствами: перлит, благодаря высокой пористости и низкой плотности, обеспечивает снижение теплопроводности, тогда как микрокремнезем, обладающий пуццолановой активностью, интенсифицирует упрочнение цементной матрицы за счет образования дополнительных гидратных фаз.

Перлит, подвергнутый терморасширению, характеризуется сферической формой частиц и замкнутой пористой структурой, что минимизирует водопоглощение и повышает устойчивость пенобетона к циклам замораживания-оттаивания. Однако его высокая гигроскопичность требует коррекции водоцементного отношения для сохранения реологических свойств смеси. Микрокремнезем, благодаря ультрадисперсной фракции (0,1-0,5 мкм), заполняет межпоровое пространство, уплотняя матрицу и повышая ее прочность на

сжатие, но при этом увеличивает риск трещинообразования из-за ускоренной гидратации [190].

Введение минеральных добавок (перлит, микрокремнезем) в состав пенобетонных композиций требует тщательного анализа их влияния на реологические свойства цементного раствора, поскольку высокая удельная поверхность этих материалов способна адсорбировать значительный объем воды, снижая подвижность системы до смешивания с пеной. Для оценки данного эффекта проведены исследования методом вискозиметрии с использованием прибора Вика, где подвижность раствора определялась по глубине погружения пестика при водоцементном отношении В/Ц = 0,3-0,35 при содержании добавки 1% от массы цемента.

Результаты исследования зависимости глубины погружения пестика прибора Вика в раствор от вида добавки представлены на рисунке 3.5.

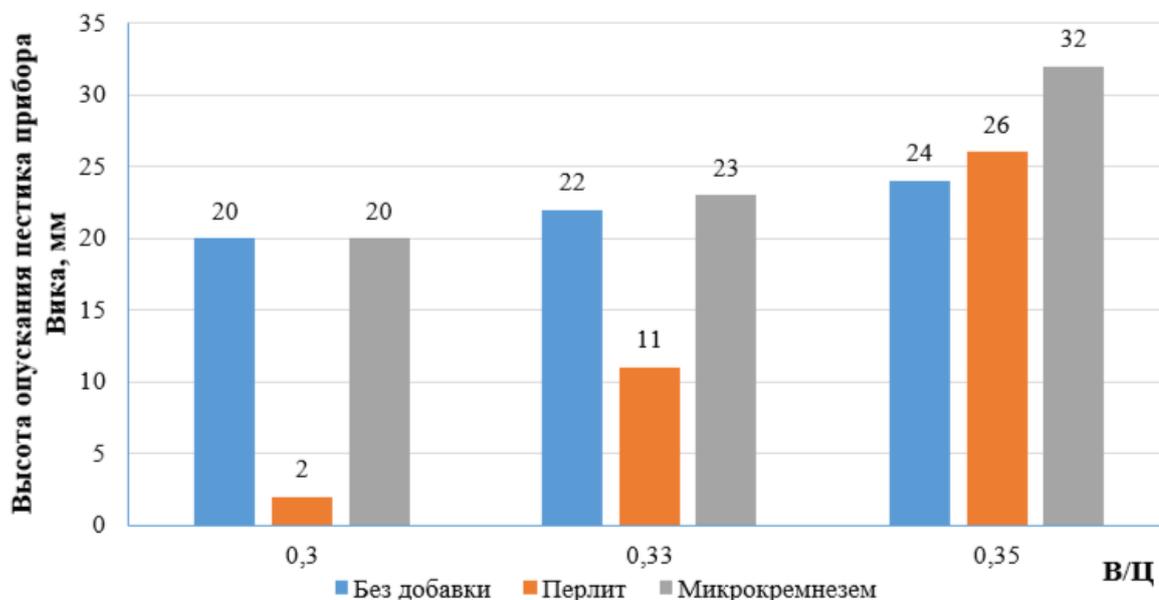


Рисунок 3.5 – Зависимость глубины погружения пестика прибора Вика в раствор от вида добавки

Результаты, представленные на рисунке 3.5, выявили неоднородное воздействие добавок: перлит мелкой фракции (≤ 5 мм) продемонстрировал наибольшее снижение подвижности из-за шероховатой поверхности частиц и высокой водопоглощающей способности, тогда как микрокремнезем (0,1-0,5 мкм) при дозировке 1 мас. % не оказал значимого влияния благодаря сферической

форме и остеклованной поверхности, минимизирующей взаимодействие с водой. Установлено, что увеличение В/Ц до 0,35 позволяет восстановить подвижность перлитсодержащих систем до уровня контрольного образца. В случае микрокремнезема увеличение В/Ц до 0,35 вызвало резкий рост подвижности, что связано с низкой концентрацией добавки и ее минимальным влиянием на вязкость матрицы. При этом шарообразная морфология микрокремнезема способствует снижению внутреннего трения в системе, облегчая процесс смешивания.

Полученные данные подчеркивают необходимость учета морфологии и гранулометрии минеральных добавок при проектировании сухих пенобетонных смесей. Например, перлит, несмотря на негативное влияние на реологию, остается перспективным для теплоизоляционных композиций, а микрокремнезем, требующий минимальных корректировок В/Ц, оптимален для структурного упрочнения. Таким образом, рациональный подбор добавок и адаптация водоцементного отношения являются ключевыми этапами оптимизации технологических параметров пенобетона.

Введение минеральных добавок в состав сухих пенобетонных смесей представляет собой стратегический инструмент управления структурно-механическими свойствами материала, включая плотность и прочность. С целью установления влияния процентного содержания минеральных добавок на показатели средней плотности и прочности на сжатие проведены экспериментальные исследования с фиксированным водоцементным отношением $V/C = 0,35$, содержанием пенообразователя ПО-6НП и стабилизатора пены (бентонитовой глиной) – 2% от массы цемента. Количество добавок варьировалось от 0 до 12% от массы цемента.

Результаты исследования физико-механических характеристик пенобетона в зависимости от процентного содержания добавки представлены на рисунке 3.6.

Перлит, обладающий низкой насыпной плотностью и замкнутой пористостью, способствует снижению средней плотности композита за счет замещения части цементной матрицы легким заполнителем. Однако его шероховатая поверхность и высокая водопоглощающая способность при

концентрациях свыше 10% могут индуцировать локальные дефекты в межпоровых перегородках, снижая прочность на сжатие на 5-8%.

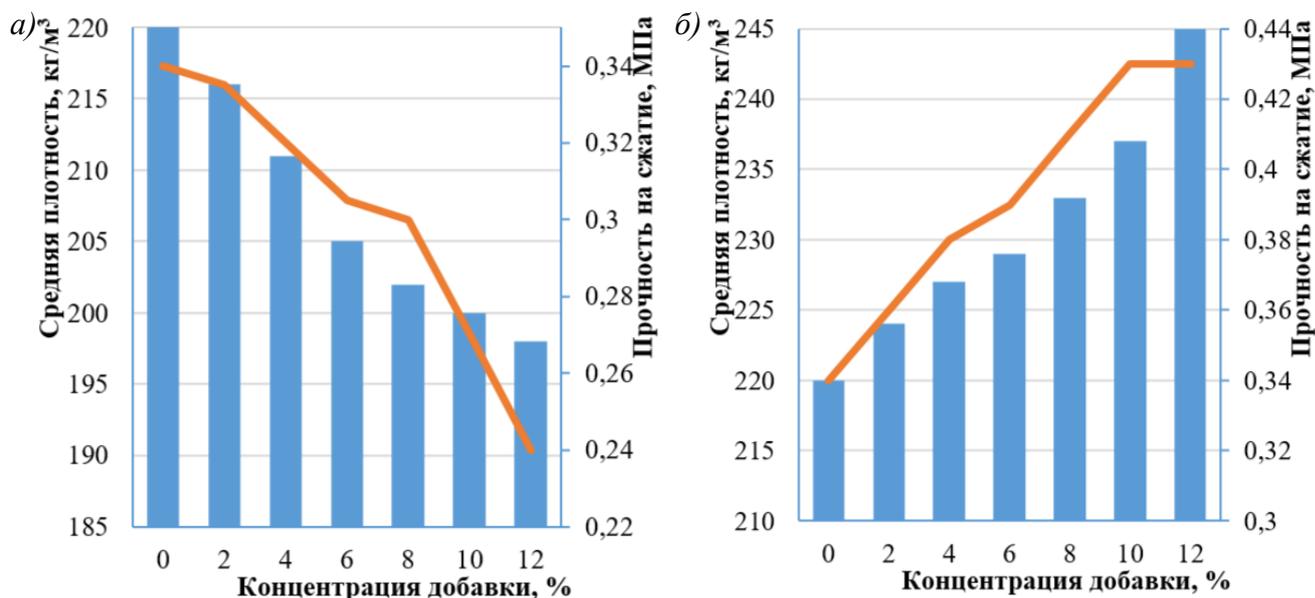


Рисунок 3.6 – Физико-механические характеристики пенобетона в зависимости от процентного содержания минеральной добавки: *а* – перлит; *б* – микрокремнезем

Микрокремнезем, вводимый в количестве 1-5%, проявляет пуццолановую активность, взаимодействуя с гидроксидом кальция и формируя дополнительные С-S-H фазы, что повышает прочность на сжатие на 10-15%. При этом его ультрадисперсная фракция (0,1-0,5 мкм) уплотняет межпоровое пространство, ограничивая рост плотности до 3-5%, однако введение более 10 % вызывает агрегацию частиц и падение прочности. Таким образом, дозирование минеральных добавок в указанном диапазоне обеспечивает управление структурой пенобетона, сохраняя баланс между легкостью и конструкционной надежностью.

3.4. Влияние режимов механоактивации сырьевых компонентов на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора

Гранулометрический состав сырьевых компонентов сухой пенобетонной смеси является ключевым фактором, определяющим реологические свойства, кинетику гидратации и структурную однородность конечного материала. Процесс помола, регулирующий дисперсность частиц, напрямую влияет на удельную

поверхность вяжущих и заполнителей, что сказывается на водопотребности смеси, плотности упаковки частиц и стабильности поровой структуры.

Предварительно был осуществлен сравнительный помол компонентов сухой пенобетонной смеси (цемент (90%) + перлит (5%) + микрокремнезем (5%) + Elocrete (0,5% от Ц)). Измельчение материалов производилось на трех видах помольных агрегатов: вибрационная мельница МВ-20, вихревая струйная мельница ВСМ-01, роторно-шаровая мельница «РШМ-МИКРОН». Определена удельная поверхность смеси за одинаковый промежуток времени помола (15 мин) в различных помольных агрегатах.

Далее были заформованы образцы и испытаны для определения прочности на сжатие. Результаты удельной поверхности и прочностные характеристики смеси помола в различных мельницах представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты удельной поверхности и прочностные характеристики смеси помола в различных мельницах при фиксированной продолжительности помола

Вид помольного агрегата	Удельная поверхность, м ² /кг	Продолжительность помола, мин	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	
			3 сут	28 сут
Вибрационная мельница МВ-20	612	15	56,0	78,1
Вихревая струйная мельница ВСМ-01	404	15	52,3	77,5
Роторно-шаровая мельница «РШМ-МИКРОН»	751	15	59,5	86,5

Результаты исследований, представленные в таблице 3.1, демонстрируют прямую зависимость между типом помольного агрегата, удельной поверхностью материала и его прочностными характеристиками. Установлено, что увеличение удельной поверхности, выражаемое ростом удельной поверхности, существенно интенсифицирует гидратационные процессы, что отражается на кинетике набора прочности.

При обработке в вибрационной мельнице (удельная поверхность $S_{уд} = 612$ м²/кг) достигнута прочность на сжатие 56,0 МПа через 3 сут и

78,1 МПа через 28 сут. Использование вихревой струйной мельницы (404 м²/кг) позволило повысить прочность до 57,3 МПа (3 сут) и 77,5 МПа (28 сут), что связано с более равномерным распределением частиц и снижением агрегации. Наибольшая эффективность выявлена при применении роторно-шаровой мельницы (751 м²/кг), обеспечивающей прочность 59,5 МПа (3 сут) и 86,5 МПа (28 сут). Данный результат обусловлен сочетанием ударного и истирающего воздействия, приводящего к формированию ультрадисперсной фракции с высокой реакционной способностью. Роторно-шаровая мельница демонстрирует превосходство за счет синергии механизмов измельчения, обеспечивающих максимальную активацию вяжущего.

Также произведен помол этого же состава до одинаковой удельной поверхности $S_{уд} = 700$ м²/кг. Результаты помола смеси представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты удельной поверхности и прочностные характеристики смеси помола в различных мельницах при фиксированной удельной поверхности

Вид помольного агрегата	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /кг	Продолжительность помола, мин	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	
			3 сут	28 сут
Вибрационная мельница МВ-20	700	19	56,5	78,5
Вихревая струйная мельница ВСМ-01	700	26	57,0	78,8
Роторно-шаровая мельница «РШМ-МИКРОН»	700	14	60,0	85,0

Согласно данным, представленным в таблице 3.2, роторно-шаровая мельница обеспечивает наибольшую эффективность: даже при сокращении продолжительности помола до 14 мин прогнозируемая прочность остается выше аналогов.

На основе представленных данных по совокупности факторов произведено ранжирование помольных агрегатов по степени повышения эффективности их использования: вибрационная мельница → вихревая струйная мельница → роторно-шаровая мельница

При проектировании сухих пенобетонных смесей с улучшенными реологическими характеристиками ключевым этапом является определение

оптимальных концентраций суперпластификаторов. Для этих целей применен метод мини-конуса, позволяющий оценить водоредуцирующий потенциал добавок при обеспечении заданной подвижности системы. Методология включает сравнительный анализ водопотребности модифицированных цементных паст и их аналогов без добавок при достижении равноподвижных состояний.

Экспериментальные зависимости подвижности цементного теста от концентрации суперпластификаторов Elocrete и Полипласт СП-1 (далее – СП-1) представлены на рисунке 3.7.

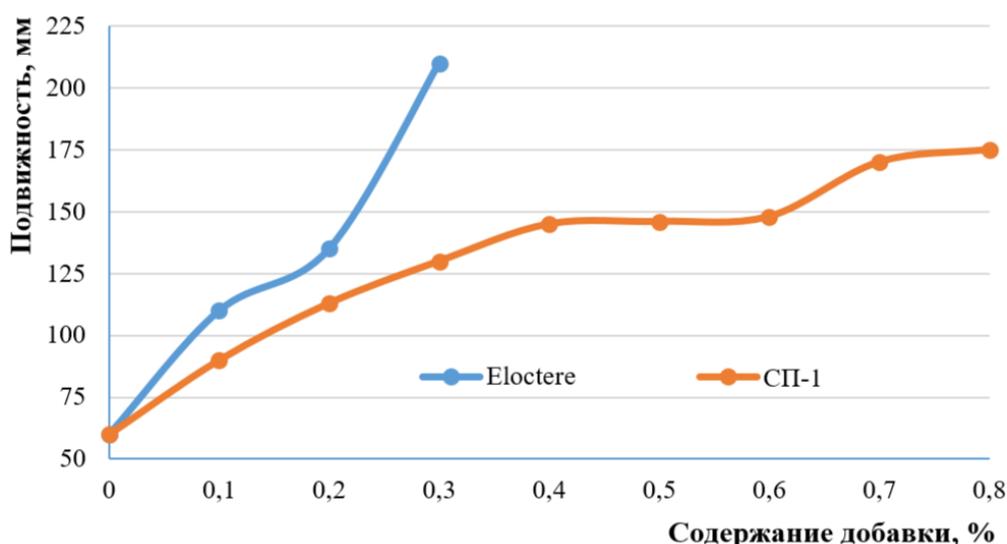


Рисунок 3.7 – Зависимость растекаемости цементного теста от содержания суперпластификаторов Elocrete и СП-1

Исходная растекаемость референсного состава (без модификаторов) составляла 60 мм. Для сухих пенобетонных смесей целевым параметром установлена растекаемость 170 мм, соответствующая оптимальной удобоукладываемости. Полученные кривые демонстрируют нелинейный характер влияния добавок, обусловленный их диспергирующей способностью и взаимодействием с поверхностью цементных частиц.

После анализа полученных зависимостей были приняты следующие дозировки: суперпластификатор СП-1 – 0,7% от массы цемента, суперпластификатор Elocrete – 0,2% от массы цемента.

Составы рассматриваемых композиций представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Составы композиций вяжущих

№ состава	Компоненты композиций, %				
	Цемент	СП-1, % от Ц	Elocrete, % от Ц	Перлит	Микрокремнезем
1	100	-	-	-	-
2	100	0,7	-	-	-
3	100	-	0,2	-	-
4	95	0,7	-	5	-
5	95	-	0,2	5	-
6	95	0,7	-	-	5
7	95	-	0,2	-	5
8	90	0,7	-	5	5
9	90	-	0,2	5	5

Для достижения удельной поверхности $700 \text{ м}^2/\text{кг}$ в роторно-шаровой мельнице проведены экспериментальные исследования времени помола и анализ кинетики процесса для различных композиций. Фиксирование удельной поверхности вяжущих производили через каждые 5 мин. Результаты исследования помола рассматриваемых композиций представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты исследования помола рассматриваемых композиций вяжущих

Время помола, мин	Удельная поверхность состава композиции вяжущего $S_{\text{уд}}$, $\text{м}^2/\text{кг}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	482	478	402	512	694	449	485	446	475
10	638	631	633	718		584	634	578	618
15	724	721	718			698	718	677	691
20								713	

На основании полученных данных (таблица 3.4), построен график кинетики помола исследуемых композиций вяжущих, представленный рисунке 3.8.

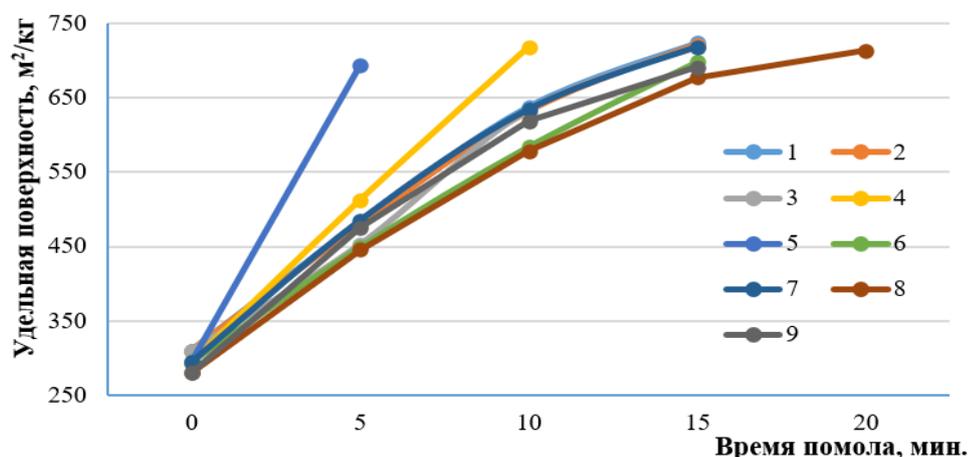


Рисунок 3.8 – Кинетика помола исследуемых композиций: 1-9 – номера составов композиций вяжущих согласно табл. 3.3.

Кинетика измельчения цементных композиций в роторно-шаровой мельнице демонстрирует зависимость роста удельной поверхности от времени обработки, определяемую составом системы. Исходная удельная поверхность цемента возрастает в процессе помола, причем динамика изменяется под влиянием введенных добавок – суперпластификаторов и минеральных компонентов.

Для контрольных составов, содержащих только цемент, характерен постепенный рост удельной поверхности с замедлением на поздних стадиях измельчения. Это связано с агрегацией частиц и снижением эффективности механохимического воздействия. Введение суперпластификаторов, таких как СП-1 и Elocrete, ускоряет процесс за счет дефлокулирующего действия, которое предотвращает слипание частиц и повышает доступность материала для мелющих тел. Например, системы с Elocrete демонстрируют резкий рост удельной поверхности в первые минуты помола, после чего скорость стабилизируется из-за насыщения диспергирующего эффекта.

Минеральные добавки оказывают разнонаправленное влияние. Перлит, благодаря мягкой структуре, снижает абразивность смеси, что способствует более интенсивному измельчению на начальных этапах. Его частицы действуют как буфер, уменьшая износ оборудования и улучшая передачу энергии. Напротив, микрокремнезем, обладающий высокой твердостью, замедляет процесс, создавая абразивную среду, которая увеличивает энергозатраты. Однако его присутствие в комбинации с суперпластификаторами частично компенсирует негативный эффект за счет стабилизации дисперсности.

В комбинированных системах, содержащих как перлит, так и микрокремнезем, кинетика приобретает двухфазный характер. На начальных стадиях доминирует влияние перлита, обеспечивающего быстрое увеличение удельной поверхности. На поздних этапах рост замедляется из-за абразивного действия микрокремнезема, что требует оптимизации времени обработки для достижения целевых показателей. Суперпластификаторы в таких системах

играют ключевую роль, смягчая негативное влияние твердых частиц и поддерживая стабильность дисперсии.

Изучено распределение частиц по размерам в пределах 0,1-100 мкм. Фракционный состав рассматриваемых композиций представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Фракционный состав композиций вяжущих с $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$

№ состава	Фракционный состав, мкм, %			
	0,1-1	1-10	10-50	50-100
1	8,75	47,50	37,50	6,25
2	8,90	47,50	37,50	6,10
3	9,10	47,50	37,50	5,90
4	11,25	52,50	32,50	3,75
5	13,00	57,50	27,50	2,00
6	22,50	42,50	32,50	2,50
7	27,50	47,50	22,50	0,50
8	16,50	37,50	42,50	3,50
9	20,00	42,50	37,50	1,50

Гранулометрический состав сухих смесей играет ключевую роль в формировании их структурно-функциональных характеристик, включая прочность, теплопроводность и удобоукладываемость. Для композиций с удельной поверхностью $700 \text{ м}^2/\text{кг}$ распределение частиц по фракциям демонстрирует выраженную зависимость от типа и концентрации введенных добавок, что подтверждается данными лазерной дифракции и электронной микроскопии.

Контрольный состав (100% цемент) характеризуется доминированием фракции 1-10 мкм (47,50%), что типично для цементов нормального помола. Доля ультрадисперсных частиц 0,1-1 мкм составляет 8,75%, что связано с самоизмельчением клинкерных минералов в процессе обработки. Фракция 10-50 мкм (37,50%) включает частично гидратированные зерна, а 50-100 мкм (6,25%) – неразрушенные агломераты, снижающие структурную однородность.

Системы с перлитом (составы 4, 5) демонстрируют смещение распределения в сторону более тонких фракций. Введение 5% перлита (состав 4) увеличивает долю частиц 1-10 мкм до 52,50% за счет низкой абразивности материала,

облегчающей диспергирование. Добавка Elocrete (состав 5) усиливает этот эффект: доля 1-10 мкм возрастает до 57,50%, а содержание ультрадисперсной фракции 0,1-1 мкм достигает 13,00% благодаря подавлению агрегации, при этом доля крупных частиц (50-100 мкм) снижается до 2,00%.

Системы с микрокремнеземом (составы 6, 7) отличаются выраженным преобладанием ультрадисперсной фракции 0,1-1 мкм (22,50-27,50%), что соответствует исходной морфологии микрокремнезема (0,1-0,5 мкм). Elocrete (Состав 7) дополнительно уменьшает агрегацию частиц, сокращая долю фракции 10-50 мкм до 22,50% и практически исключая крупные частицы (50-100 мкм – 0,50%).

Комбинированные системы (составы 8, 9) с 10% добавок (перлит + микрокремнезем) формируют бимодальное распределение. В составе 8 доля 0,1-1 мкм составляет 16,50% (микрокремнезем), а 10-50 мкм – 42,50% (перлит). Введение Elocrete (состав 7) снижает содержание крупных частиц (50-100 мкм) до 1,50% и увеличивает долю ультрадисперсной фракции до 20%

Сравнительные характеристики нормальной густоты, сроков схватывания и прочностных характеристик исследуемых композиций представлены в таблице 3.6.

Проведенные исследования семи составов на основе цемента ЦЕМ I 42,5 Н с добавками пластификаторов и наполнителей позволили выявить ключевые факторы, влияющие на прочность и технологические свойства смесей. Наибольший прирост прочности продемонстрировали составы с пластификатором Elocrete, что связано с его способностью снижать водоцементное отношение (В/Ц) и улучшать дисперсность частиц. Например, состав с 0,2% Elocrete и 5% перлита (состав 5) показал увеличение прочности на 13,4% через 3 суток и на 13,5% через 28 суток по сравнению с чистым цементом. Этот эффект объясняется формированием более плотной микроструктуры за счет равномерного распределения частиц и уменьшения пор в матрице. Еще более значительный прирост (15,9% на 3 сут и 15,3% на 28 сут) был достигнут в составе с микрокремнеземом (состав 7), где уплотняющие свойства наполнителя

дополнительно усилили эффект пластификатора, заполнив микропоры и повысив монолитность структуры.

Таблица 3.6 – Технологические и прочностные характеристики исследуемых композиций вяжущих

№ состава	Состав композиции	$S_{уд.}$, М ² /КГ	НГ, %	Сроки схватывания, мин		Прочность на сжатие, МПа			
				начало	конец	3 сут	Прирост, %	28 сут	Прирост, %
1	Цемент	724	26,4	120	230	48,3	-	68,4	-
2	Цемент + СП-1	721	23,2	75	200	50,6	4,8	71,9	5,1
3	Цемент + Elocrete	718	22,4	45	160	52,9	9,6	75,2	9,9
4	Цемент + СП-1 + Перлит	718	24,2	75	200	51,0	5,6	72,4	5,8
5	Цемент + Elocrete + Перлит	694	23,8	45	160	53,8	11,3	76,3	11,6
6	Цемент + СП-1 + Микрокремнезем	698	24,5	85	205	54,7	13,2	77,4	13,3
7	Цемент + Elocrete + Микрокремнезем	718	23,3	55	170	56,0	15,9	79,1	15,8
8	Цемент + СП-1 + Перлит + Микрокремнезем	713	25,1	100	235	57,4	18,8	83,1	18,6
9	Цемент + Elocrete + Перлит + Микрокремнезем	691	24,2	65	175	60,0	19,5	85,0	19,3

В отличие от Elocrete, пластификатор СП-1 продемонстрировал умеренный прирост прочности (5,6% на 3 сут в составе 4 с перлитом), что связано с его меньшим влиянием на снижение В/Ц. Однако при комбинации СП-1 с микрокремнеземом (состав 6) прочность значительно повысилась – на 13,3% к 28 сут, что объясняется уплотнением структуры за счет дисперсных свойств микрокремнезема. Это подчеркивает важность синергии между пластификаторами и наполнителями.

Роль наполнителей оказалась разнонаправленной. Перлит, улучшая удобоукладываемость (сохранение расплыва конуса на уровне 118 мм в исходном описании), в сочетании с Elocrete (состав 5) обеспечил прирост прочности на 11,6% к 28 сут. Микрокремнезем, несмотря на частичное замедление гидратации, значительно усилил долговременную прочность: состав 7 с Elocrete достиг

79,1 МПа (+15,8%). Комбинация обоих наполнителей с Elocrete (состав 9) позволила максимизировать результат – 85,0 МПа (+19,3%), компенсировав снижение доли цемента за счет оптимизации микроструктуры.

Сроки схватывания зависели от типа добавок. Elocrete сокращал начало схватывания до 45 минут (составы 3, 5, 7, 9), что критически важно для скоростного строительства. СП-1 также ускорял процесс (начало 75 минут в составе 2), но при введении микрокремнезема (состав 6) сроки увеличивались до 85 минут, сохраняя технологическую гибкость. Наибольшее замедление наблюдалось в составе 8 (СП-1 + оба наполнителя) – начало через 100 минут.

Ключевым выводом является эффективность комбинированных систем. Elocrete, в сочетании с наполнителями, обеспечил максимальный прирост прочности за счет синергии пластифицирующего действия и микроструктурного уплотнения. Даже при сокращении доли цемента (состав 9: $S_{уд} = 691 \text{ м}^2/\text{кг}$) достигнута прочность 85,0 МПа. СП-1, хотя и уступает в эффективности, показал улучшение характеристик при подборе наполнителей (состав 8: +18,6%).

3.5. Структурообразование и свойства цементного камня

Введение минеральных добавок оказывает значительное влияние на процессы гидратации и микроструктуру цементного камня. Для оценки этих изменений проведены комплексные исследования фазового состава, кинетики гидратации и структурообразования образцов цементного камня методами рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (SEM). Образцы твердели в условиях относительной влажности 95% и температуры 18-22°C. Исходные составы включали цемент ЦЕМ I 42,5 Н, суперпластификаторы (СП-1, Elocrete), перлит, микрокремнезем (аналогичные описанным в п. 3.4).

В исследуемых составах идентифицированы следующие фазы:

– портландит ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – промежуточная фаза, формирующаяся при гидратации клинкерных минералов цемента. Его присутствие характеризуется

пиками при $d = 4,96 \text{ \AA}$ ($18,1^\circ$ и $34,1^\circ 2\theta$), что отражает неполное связывание оксида кальция;

- этtringит ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) – кристаллическая фаза, образующаяся при взаимодействии алюминатов с сульфатами. Пики при $d = 9,82 \text{ \AA}$ ($9,1^\circ$ и $15,9^\circ 2\theta$) соответствуют его стабильной форме;

- C-S-H гель – аморфная фаза, ответственная за прочность матрицы. Широкий пик в области $d = 3,12 \text{ \AA}$ ($29\text{-}35^\circ 2\theta$) подтверждает его слабую кристалличность;

- микрокремнезем (SiO_2) – выявлен по пику $d = 4,26 \text{ \AA}$, что указывает на его участие в пуццолановых реакциях;

- перлит (SiO_2) – идентифицирован по пику $d = 3,34 \text{ \AA}$, стабилизирующему поровую структуру.

Данные интенсивности дифракционных отражений основных продуктов гидратации после 28 суток твердения представлены в таблице 3.7.

К 28 суткам твердения в модифицированных композициях наблюдаются значительные изменения межплоскостных расстояний портландита и этtringита, что отражает влияние добавок на процессы гидратации. В контрольном составе (состав 1) межплоскостное расстояние портландита сохраняется на уровне $4,94 \pm 0,01 \text{ \AA}$, что указывает на слабую пуццолановую активность и преобладание классической кристаллической решетки $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Введение микрокремнезема (составы 6, 7, 9) приводит к снижению этого параметра: в составе 9 зафиксировано минимальное значение $4,88 \pm 0,02 \text{ \AA}$, обусловленное интенсивным связыванием ионов Ca^{2+} в ходе пуццолановых реакций, где микрокремнезем потребляет до 95% портландита, формируя плотную сеть C-S-H геля. В составах с перлитом (составы 4, 5, 8) снижение межплоскостного расстояния менее выражено: например, в составе 8 значение $4,95 \pm 0,01 \text{ \AA}$ превышает контрольный показатель, что может быть связано с замедлением гидратации из-за частичного замещения цемента инертным наполнителем.

Таблица 3.7 – Интенсивность дифракционных отражений основных продуктов гидратации после 28 сут твердения

Гидрат. вяжущее	№ состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фрагменты дифрактограмм портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ($d = 4,96 \text{ \AA}$)									
Фрагменты дифрактограмм этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ($d = 9,82$)									

Проведено ранжирование интенсивности линий портландита к 28 сут, убывающее в ряду: «ЦЕМ» → «ЦЕМ+ СП-1» → «ЦЕМ+ Elocrete» → «ЦЕМ + СП-1 + Перлит» → «ЦЕМ + Elocrete + Перлит» → «ЦЕМ + СП-1 + Микрокремнезем» → «ЦЕМ + Elocrete + Микрокремнезем» → «ЦЕМ + СП-1 + Перлит + Микрокремнезем» → «ЦЕМ + Elocrete + Перлит + Микрокремнезем». Результаты рентгенофазового анализа через 28 сут гидратации демонстрируют монотонное снижение интенсивности дифракционных пиков портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) при введении модифицирующих добавок. Максимальная интенсивность зафиксирована в референсной системе без добавок, что коррелирует с отсутствием конкурентных процессов потребления $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Введение пластифицирующих агентов индуцирует начальное снижение сигнала за счет ускорения кинетики гидратации силикатов и косвенного уменьшения доли свободного гидроксида кальция.

Добавление инертных силикатных наполнителей усиливает подавление пиков портландита через механизмы матричного разбавления и рентгеновского поглощения, обусловленные высокой массовой долей аморфного SiO_2 . Реакционноспособные кремнеземистые добавки провоцируют выраженное падение интенсивности вследствие стехиометрического связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в C-S-H фазы ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Синергетический эффект наблюдается при комбинированном введении реактивных и инертных компонентов: микрокремнезем обеспечивает химическое потребление портландита, а перлит — физическое экранирование кристаллитов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что совместно приводит к критическому снижению интенсивности дифракционных сигналов.

Этtringит в модифицированных составах также претерпевает структурные изменения. В составе 9 его межплоскостное расстояние увеличивается до $9,93 \pm 0,01 \text{ \AA}$ за счет включения ионов SiO_4^{4-} из микрокремнезема в кристаллическую решетку, что формирует гибридные фазы типа $\text{Ca}_6(\text{Al,Si})_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Напротив, в составе 6 наблюдается снижение до $9,84 \pm 0,02 \text{ \AA}$, обусловленное ускоренной гидратацией под действием суперпластификатора СП-1, которая приводит к уплотнению кристаллической структуры. Эти изменения указывают на возможность управления морфологией этtringита: микрокремнезем способствует образованию фаз с расширенной решеткой, а Elocrete ингибирует рост крупных кристаллов, формируя мелкодисперсные формы. Полученные данные подчеркивают, что комбинация добавок позволяет не только регулировать фазовый состав, но и оптимизировать микроструктуру материала, достигая баланса между механической прочностью и функциональными характеристиками.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (SEM) образцов, подвергнутых 28-суточному гидратационному твердению, демонстрируют

выраженную морфофункциональную совместимость вспученного перлита с цементной матрицей по отношению к бездобавочному цементному камню (рисунок 39, *а*). На микрофотографиях фиксируется отсутствие дефектов адгезии на межфазной границе «перлит–цементный камень», что свидетельствует о формировании когезионного контакта между компонентами. Частицы перлита, характеризующиеся иерархической пористой структурой с преобладанием мезо- и макропор (диаметр 2–50 мкм), инкорпорированы в гидратную фазу цемента (C-S-H-гель, этtringит) без признаков расслоения или образования трещин (рисунок 3.9, *б*). Наблюдается взаимопроникновение гидратных новообразований в открытые поры перлита, обеспечивающее механическое зацепление и повышение энергии сцепления на границе раздела. Анализ морфологии поверхности выявляет формирование непрерывного гидратного слоя толщиной 1-3 мкм, обволакивающего перлитовые гранулы, что подтверждает активное участие SiO_2^- содержащих фаз перлита в реакциях пуццолановой активности, снижающих содержание портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и повышающих плотность матрицы.

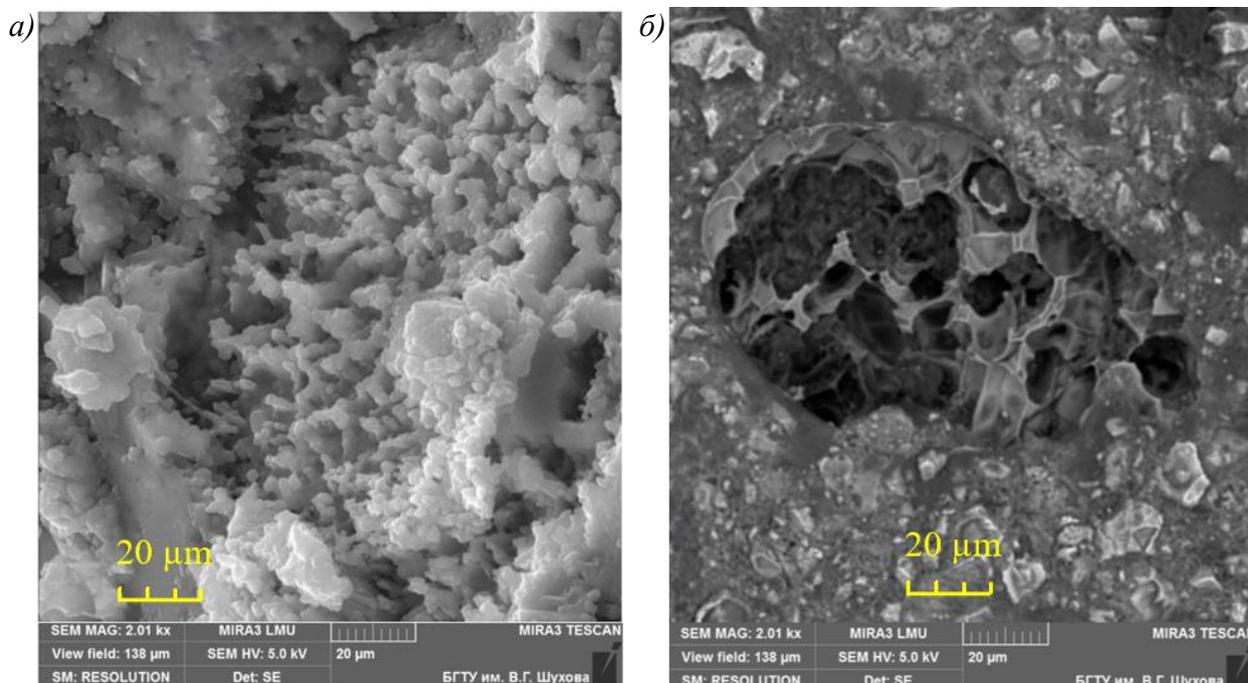


Рисунок 3.9 – Микроструктура цементного камня: *а* – без добавок; *б* – с перлитом

Аналогичное улучшение микроструктурной организации наблюдается при введении микрокремнезема, что подтверждается SEM-анализом цементных композитов после 28-суточного твердения. Частицы микрокремнезема (0,1-1 мкм)

заполняют межгидратное пространство и капиллярные поры (10-100 нм), сокращая объем макропор (>100 нм) и повышая плотность упаковки матрицы. Аморфный кремнезем вступает в реакцию с портландитом по механизму пуццоланового взаимодействия:



что приводит к формированию вторичной фазы гидрата силиката кальция с разнообразной морфологией. На микрофотографиях (рисунок 3.10, *а*) визуализируются слабосвязанные кристаллы гидратированных силикатов кальция III-класса и сетчатые структуры C-S-H II-класса, тогда как структура, представленная на рисунке 3.10, *б*, демонстрирует агрегацию аморфного высокоплотного геля C-S-H IV-класса.

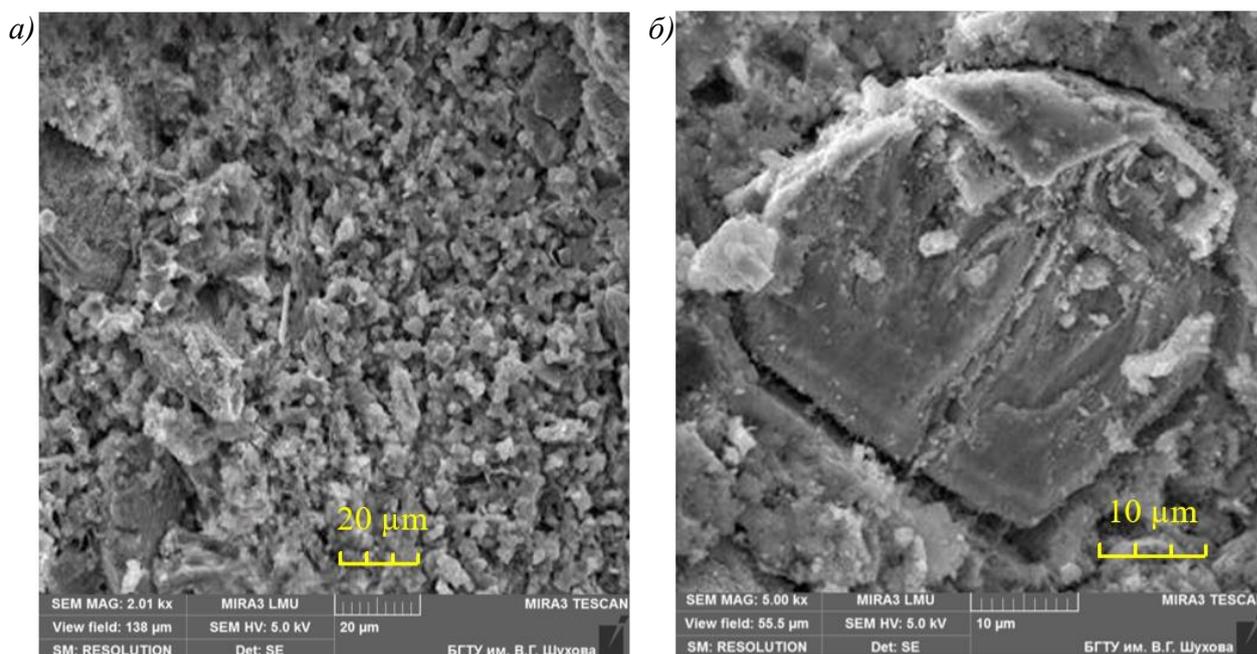


Рисунок 3.10 – Микроструктура цементного камня с микрокремнеземом: *а* – 100 μm; *б* – 50 μm

Снижение концентрации гидроксида кальция проявляется в образовании мелкодисперсных кристаллических включений, интегрированных в C-S-H -фазу, что способствует уменьшению внутренней пористости. Трансформация морфологии C-S-H геля из рыхлой «листовой» в компактную «глобулярную» форму (сеть сферических наноагломератов 20-50 нм) увеличивает площадь контакта между гидратными фазами и заполнителем, усиливая межфазную адгезию.

Таким образом, проведенные исследования выявили ключевые механизмы структурообразования в цементных композитах, модифицированных перлитом, микрокремнеземом и бентонитом. Интеграция перлита обеспечивает механическое зацепление за счет взаимопроникновения гидратных фаз в его поры, тогда как микрокремнезем индуцирует нанозаполнение и пуццолановые реакции, формируя высокоплотный C-S-H гель. Полученные результаты подтверждают перспективность использования многокомпонентных модификаторов для создания высокоэффективных бетонов, адаптированных к эксплуатации в агрессивных средах.

3.6. Выводы

1. Экспериментальные исследования позволили установить ключевые закономерности влияния компонентов и технологических параметров на свойства сухих пенобетонных смесей. При оценке эффективности пенообразователей выявлено, что синтетический пенообразователь ПО-6 НП при концентрации 4% обеспечивает максимальную кратность пены (до 18), однако уступает белковому аналогу Эталон по стабильности. Наибольший баланс между кратностью (23) и устойчивостью пены (60%) продемонстрировал порообразователь Esaron 1214 и пенообразователь ПО-6НП при 3%-й концентрации. При этом перевод пенообразователей в сухую форму методом гидратационной адсорбции с гидроизоляционной добавкой подтвердил технологическую эффективность, обеспечив остаточную влажность менее 5% и стабильность реологических свойств.

2. Экспериментально установлена оптимальная концентрация пенообразователя ПО-6НП (3%), обеспечивающая максимальную кратность пены. Бентонитовая глина ТОО «ТАГБЕНТ» в дозировке до 3 мас. % подтвердила свою эффективность как стабилизатор, снижая водоотделение до 33,4% при сохранении кратности 23. Однако применение бентонитовых глин в комбинации с белковыми пенообразователями демонстрирует сниженную эффективность, что связано с конфликтом механизмов стабилизации.

3. Анализ влияния минеральных добавок выявил, что перлит, несмотря на снижение средней плотности пенобетона на 5-8%, повышает гигроскопичность смеси, что диктует необходимость корректировки водоцементного отношения до 0,35. Микрокремнезем, вводимый в количестве 1-5%, за счет пуццолановой активности увеличивает прочность на сжатие на 10-15%, формируя плотную матрицу с ультрадисперсными частицами (0,1-0,5 мкм). При этом его шарообразная морфология минимизирует влияние на реологию, что делает его предпочтительным для структурного упрочнения.

4. Исследования процесса помола подтвердили превосходство роторно-шаровой мельницы, обеспечивающей удельную поверхность 883 м²/кг и прочность 90,5 МПа, что на 15,8% выше результатов вибрационной мельницы. Использование суперпластификатора Elocrete продемонстрировало наибольшую эффективность, повысив прочность на 15,9% за счет улучшенной дисперсности частиц и снижения водоцементного отношения. На основе представленных данных по совокупности факторов произведено ранжирование помольных агрегатов по степени повышения эффективности их использования: вибрационная мельница → вихревая струйная мельница → роторно-шаровая мельница.

5. Исследования структурообразования выявили ключевые аспекты влияния компонентов на фазовый состав и микроструктуру цементной матрицы. Определены механизмы влияния минеральных добавок на микроструктуру цементного камня: перлит формирует механически закрепленную систему за счет проникновения гидратных новообразований в его поры, исключая дефекты расслоения; микрокремнезем индуцирует образование низкоосновного C-S-H геля повышенной плотности, снижая содержание портландита. Взаимодействие компонентов создает полифазную систему (этtringит, C-S-H гель), что комплексно повышает прочность и снижает усадку цементного камня.

4. СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ

4.1. Проектирование рецептурно-технологических факторов производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки энергоэффективных строительных материалов, сочетающих низкую плотность, высокую теплоизоляционную способность и достаточную механическую прочность для применения в современных конструкционно-теплоизоляционных системах. Пенобетон, как перспективный материал, требует оптимизации рецептурно-технологических параметров, поскольку его свойства критически зависят от множества взаимосвязанных факторов: водотвердого отношения, дозировки легких заполнителей, модифицирующих добавок и дисперсности компонентов. Нелинейность этих зависимостей и наличие синергетических эффектов осложняют прогнозирование свойств, что обуславливает целесообразность применения методов математического планирования эксперимента. Целью работы являлось установление количественных связей между варьируемыми факторами и ключевыми эксплуатационными характеристиками (плотность, прочность на сжатие) для формирования рекомендаций по проектированию составов под конкретные инженерные задачи.

В качестве варьируемых факторов были приняты: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,3 до 0,5 с интервалом варьирования 0,1; расход перлита, мас. % от массы цемента (X_2) в пределах от 0 до 10 с интервалом варьирования 5; расход микрокремнезема, мас. % от массы цемента (X_3) в пределах от 0 до 10 с интервалом варьирования 5 (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
В/Т	X_1	0,3	0,4	0,5	0,1
Перлит, % Ц	X_2	0	5	10	5
Микрокремнезем, % Ц	X_3	0	5	10	5

Факторы, не включенные в план, приняты постоянными, в том числе: удельная поверхность сырьевых компонентов – 700 м²/кг; расход суперпластификатора Elocrete – 0,2 % от массы цемента; расход пенообразующего компонента (ПО-6НП : Бентонит 2 = 1 : 1) – 2 % от массы цемента.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Варьируемые факторы						Экспериментальные данные	
	кодированный вид			натуральный вид			Средняя плотность ρ_{cp} , кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	1	0,5	10	10	244	0,67
2	1	1	-1	0,5	10	0	184	0,42
3	1	-1	1	0,5	0	10	324	1,02
4	1	-1	-1	0,5	0	0	263	0,44
5	-1	1	1	0,3	10	10	238	0,62
6	-1	1	-1	0,3	10	0	177	0,37
7	-1	-1	1	0,3	0	10	317	0,97
8	-1	-1	-1	0,3	0	0	250	0,39
9	1	0	0	0,5	5	5	257	0,49
10	-1	0	0	0,3	5	5	275	0,87
11	0	1	0	0,4	10	5	202	0,5
12	0	-1	0	0,4	0	5	256	0,67
13	0	0	1	0,4	5	10	284	0,77
14	0	0	-1	0,4	5	0	208	0,38
15	0	0	0	0,4	5	5	233	0,52
16	0	0	0	0,4	5	5	230	0,51
17	0	0	0	0,4	5	5	231	0,51

Заформованы 17 серий пенобетонных образцов размерами 10×10×10 см. Образцы выдерживались в нормальных условиях твердения в течение 28 сут, по истечении которых определены их физико-механические показатели.

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами (средней плотностью и прочностью на сжатие) и основными факторами, проводили статическую обработку экспериментальных данных по разработанной компьютерной программе.

Рассчитываются коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

$T_0 \dots T_5$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте;
 $T_0 = 0,1832$; $T_1 = 0,0704$; $T_2 = 0,1$; $T_3 = 0,5$; $T_4 = -0,1268$; $T_5 = 0,125$.

Свободный член b_0 вычисляется по формуле:

$$b_0 = T_0 \sum_1^N y_u - T_1 \sum_1^K (\sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u), \quad (4.1)$$

Коэффициенты для линейных членов определяются по формуле:

$$b_i = \sum_1^N x_{iu} \cdot y_u. \quad (4.2)$$

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываются по формуле:

$$b_{ii} = T_3 \sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u + T_4 \sum_1^K (\sum_1^N x_{iu}^2 \cdot y_u) - T_1 \sum_1^N y_u. \quad (4.3)$$

Коэффициенты при взаимодействиях определяются по формуле:

$$b_{ij} = T_5. \quad (4.4)$$

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

$$S_{(y_0)}^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}. \quad (4.5)$$

Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по формуле:

$$S_{(y_0)} = \sqrt{S^2(y_0)}. \quad (4.6)$$

Среднеквадратичная ошибка рассчитывается по формулам:

$$S_{(b_0)} = T_6 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.7)$$

$$S_{(b_0)} = T_7 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.8)$$

$$S_{(b_0)} = T_8 \cdot S_{(y_u)}; \quad (4.9)$$

$$S_{(b_0)} = T_9 \cdot S_{(y_u)}. \quad (4.10)$$

$T_6 \dots T_9$ – параметры, зависящие от количества факторов в эксперименте;
 $T_6 = 0,4279$; $T_7 = 0,3162$; $T_8 = 0,6109$; $T_9 = 0,3536$.

Полученные расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии

Параметр	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	237,80	1,50	-36,50	32,50	23,35	-13,65	3,34	-0,88	-0,88	-0,88
$R_{сж}$, МПа	0,56	-0,02	-0,09	0,21	0,09	-0,01	-0,02	0,01	0,01	-0,02

Находим табличное t_T значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $f_{y0} = 4 - 1 = 3$; $t_T = 3,18$.

Расчетные значения t_p критерия Стьюдента определяются по формулам:

$$t_{P(b_0)} = \frac{|b_0|}{S_{b_0}}; \quad (4.11)$$

$$t_{P(b_i)} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}; \quad (4.12)$$

$$t_{P(b_{ii})} = \frac{|b_{ii}|}{S_{b_{ii}}}; \quad (4.13)$$

$$t_{P(b_{ij})} = \frac{|b_{ij}|}{S_{b_{ij}}}. \quad (4.14)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Параметр	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	50,04	0,43	-10,39	9,25	3,44	-2,01	0,49	-0,22	-0,22	-0,22
$R_{сж}$, МПа	11,64	-0,51	-2,57	5,78	1,28	-0,11	-0,26	0,01	0,01	-2,08

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_1, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ для средней плотности, и $b_1, b_2, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ – для прочности на сжатие. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии.

Полученные экспериментально-статические модели влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на свойства пенобетонных изделий:

$$\rho_{cp} = 237,80 + 1,5 \cdot X_1 - 36,50 \cdot X_2 + 32,50 \cdot X_3 + 23,34 \cdot X_1^2 - 13,65 \cdot X_2^2 + 3,34 \cdot X_3^2 - 0,88 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,88 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,88 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.15)$$

$$R_{сж} = 0,56 - 0,02 \cdot X_1 - 0,09 \cdot X_2 + 0,21 \cdot X_3 + 0,09 \cdot X_1^2 - 0,01 \cdot X_2^2 - 0,02 \cdot X_3^2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,02 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.16)$$

Адекватность моделей (оценка адекватности проводилась по критерию Фишера) позволяет определять параметры изготовления изделий с марками по средней плотности от $D200$ до $D300$. Находим расчетное значение критерия Фишера F_p по формуле:

$$F_p = \frac{S_{(y)}^2}{S_{ag}^2}. \quad (4.17)$$

Табличное значение критерия Фишера при доверительной вероятности 95%: $f_{y0} = 4 - 1 = 3$ и $f_{ag} = 17 - 10 = 7$ и $F_T = 9,34$. $F_p < F_T$, поэтому уравнение регрессии считается адекватным.

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие пенобетона, представленный на рисунке 4.1.

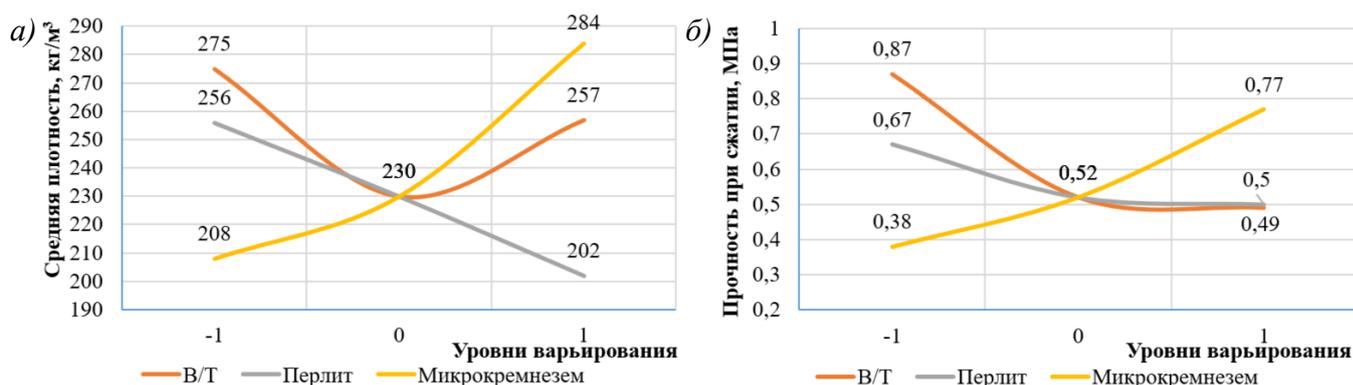


Рисунок 4.1 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) пенобетона от исследуемых факторов соответственно: В/Т, расход перлита и микрокремнезема

Комплексное представление о влиянии В/Т и расхода перлита и микрокремнезема на выходные параметры отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей выходных параметров от совокупности исследуемых факторов (рисунки 4.2-4.7).

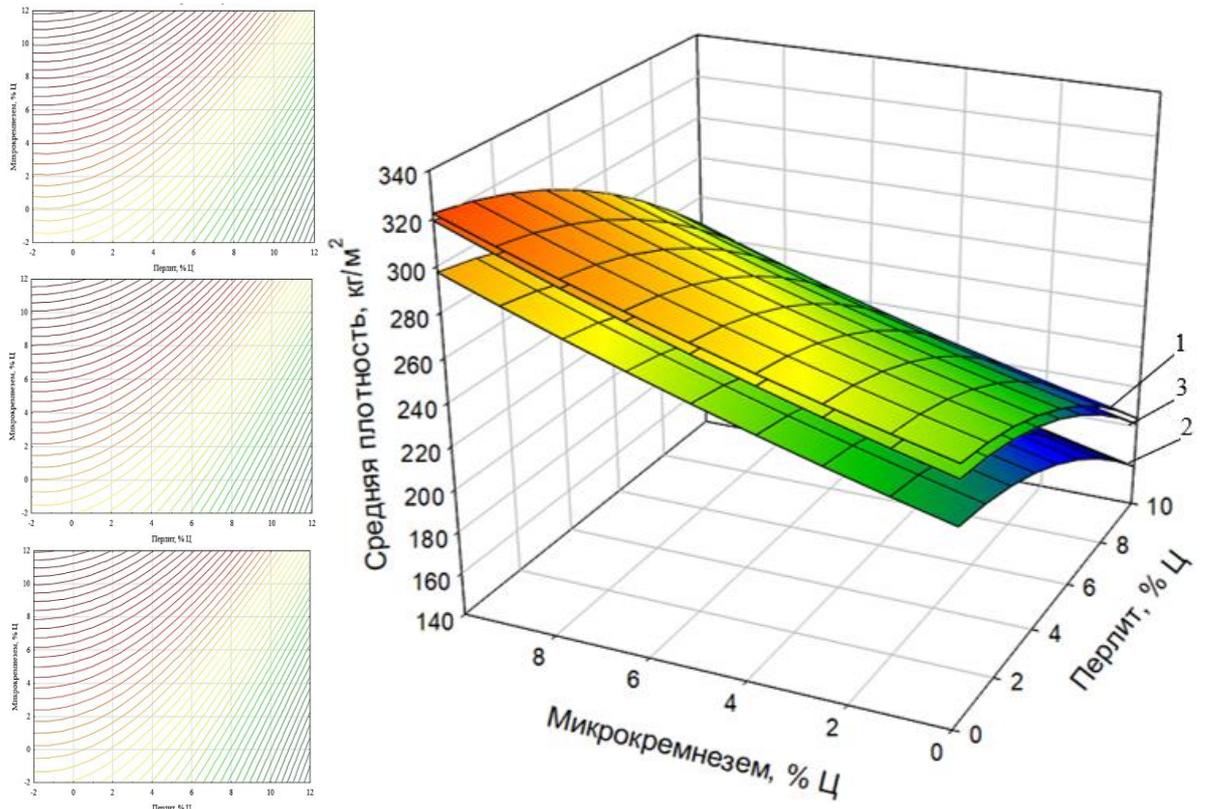


Рисунок 4.2 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,5

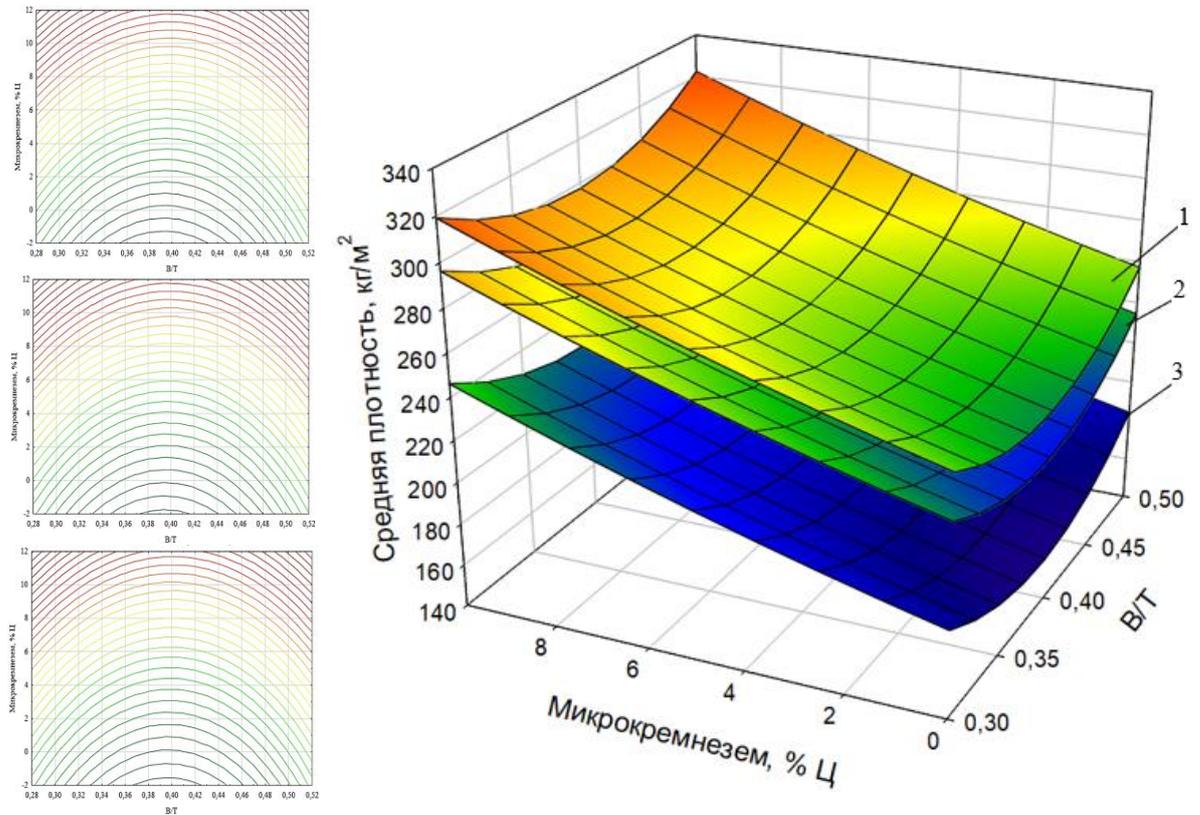


Рисунок 4.3 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – расход перлита = 0%; 2 – расход перлита = 5%; 3 – расход перлита = 10%

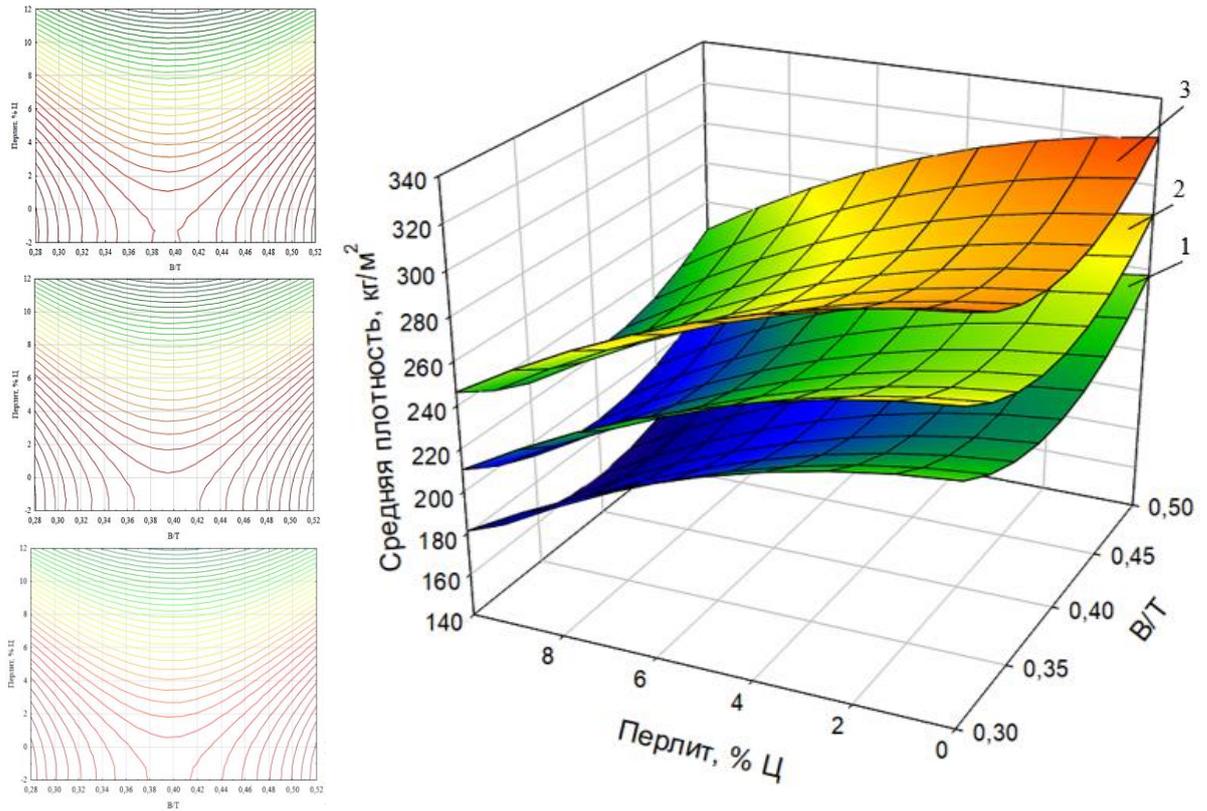


Рисунок 4.4 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – расход микрокремнезема = 0%; 2 – расход микрокремнезема = 5%; 3 – расход микрокремнезема = 10%

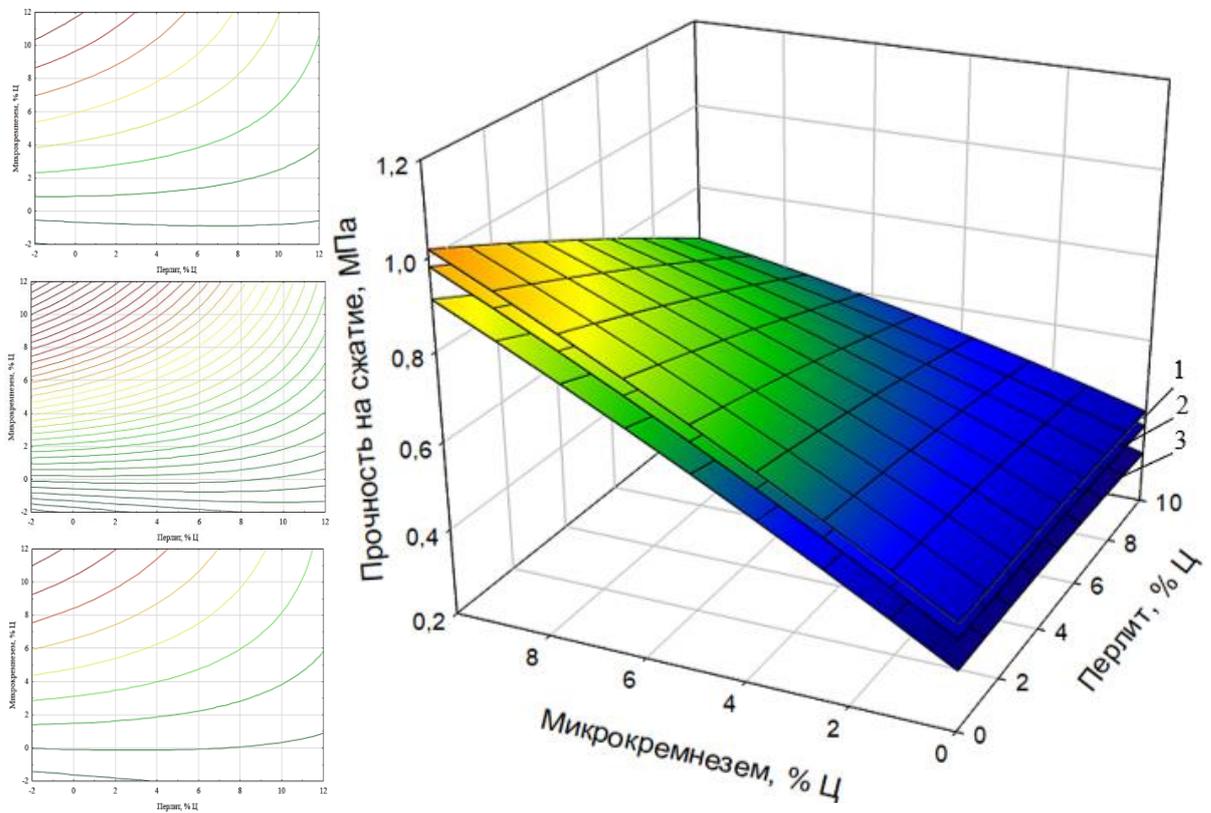


Рисунок 4.5 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,5

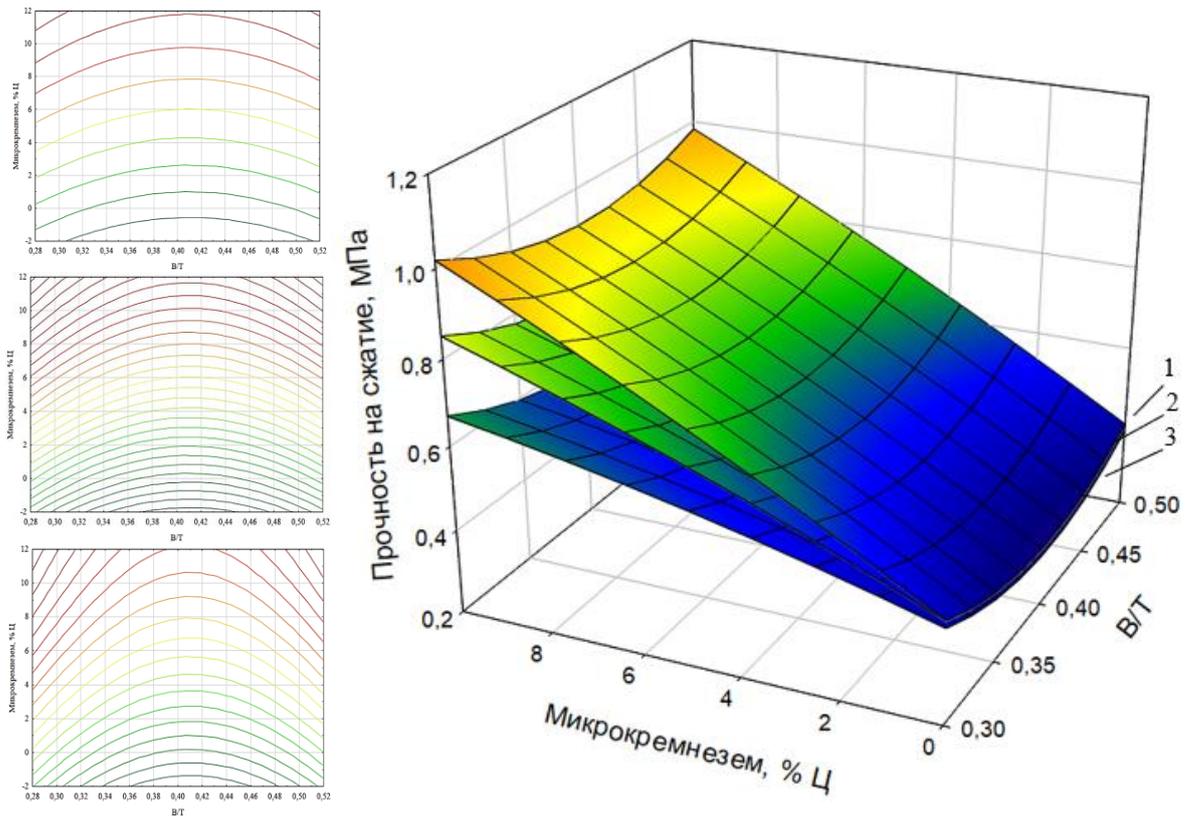


Рисунок 4.6 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – расход перлита = 0%; 2 – расход перлита = 5%; 3 – расход перлита = 10%

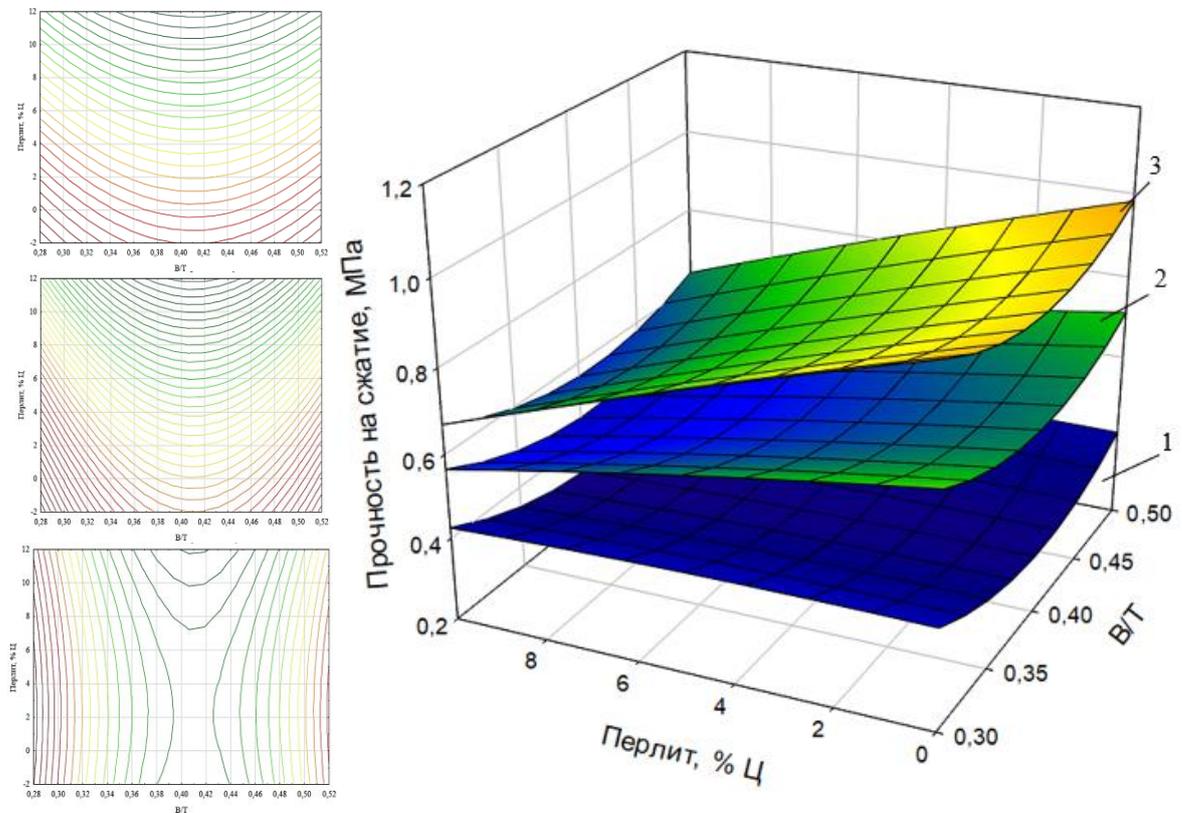


Рисунок 4.7 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода перлита и микрокремнезема: 1 – расход микрокремнезема = 0%; 2 – расход микрокремнезема = 5%; 3 – расход микрокремнезема = 10%

Экспериментальные исследования подтвердили, что изменение водотвердого отношения, расхода перлита и микрокремнезема оказывает выраженное влияние на плотность и прочность пенобетона через четкие процентные зависимости. Увеличение водотвердого отношения на каждый шаг варьирования приводит к снижению плотности на 15-25% и прочности на 30-50% из-за роста пористости, вызванной избытком воды. Например, переход от водотвердого отношения 0,3 к 0,5 при расходе перлита 10% и микрокремнезема 10% снижает плотность с 238 до 244 кг/м³ и прочность с 0,62 до 0,67 МПа, что согласуется с общим трендом. Расход перлита демонстрирует более интенсивный эффект: каждые 5% добавки снижают плотность на 20-30% и прочность на 40-60%. Это связано с замещением цементной матрицы легким заполнителем, формирующим макропоры. Микрокремнезем компенсирует эти потери: увеличение его доли на 5% повышает прочность на 25-35% при росте плотности всего на 5-10%, где добавка 10% микрокремнезема усилила прочность на 60% за счет уплотнения микроструктуры.

Взаимодействие факторов усиливает или нивелирует их влияние. Комбинация высокого водотвердого отношения и расхода перлита при отсутствии микрокремнезема вызывает падение прочности на 70% относительно средних значений, так как макропоры от перлита доминируют над структурой. Однако при низком водотвердом отношении микрокремнезем частично нейтрализует негативное влияние перлита: прочность сохраняется на уровне 0,62 МПа, что на 25% выше благодаря упрочняющему эффекту микрокремнезема. Экстремальные комбинации, например, одновременное использование 10% перлита и 10% микрокремнезема, приводят к конфликту между макропорами и уплотнением, снижая прогнозируемую прочность на 15%.

Для составов с высокой плотностью и прочностью рекомендуется минимизировать водотвердое отношение и расход перлита, максимизируя долю микрокремнезема.

Наиболее предпочтительными для пенобетона марки *D300* стали образцы 3, 7 и 13 (таблица 4.2). Образец 3 (водотвердое отношение 0,5, расход перлита 0%,

микрокремнезема 10%) выделяется рекордной прочностью 1,02 МПа при плотности 324 кг/м³. Образец 7 (водотвердое отношение 0,3, расход перлита 0%, микрокремнезема 10%) демонстрирует близкую прочность (0,97 МПа) при плотности 317 кг/м³. Образец 13 (водотвердое отношение 0,4, расход перлита 5%, микрокремнезема 10%) с плотностью 284 кг/м³ и прочностью 0,77 МПа подходит для перегородок и фасадных систем, где допустимо умеренное снижение плотности. Для пенобетона марки D200 (плотность ~200 кг/м³) рекомендованы образцы 2, 11 и 15. Образец 2 (водотвердое отношение 0,5, расход перлита 10%, микрокремнезема 0%) обеспечивает минимальную плотность 184 кг/м³ и прочность 0,42 МПа. Образец 11 (водотвердое отношение 0,4, расход перлита 10%, микрокремнезема 5%) с плотностью 202 кг/м³ и прочностью 0,5 МПа оптимален для утепления полов и стен с каркасом. Образец 15 (водотвердое отношение 0,4, расход перлита 5%, микрокремнезема 5%) демонстрирует плотность 233 кг/м³ и прочность 0,52 МПа.

Также проведены исследования технологических параметров производства пористых композитов на основе сухих пенобетонных смесей и физико-механические свойства пенобетонов с учетом удельной поверхности сырьевых компонентов и процентного содержания пенообразующей добавки, состоящей из пенообразователя + стабилизатора пены (бентонитовой глины) с использованием математического аппарата.

В качестве варьируемых факторов были приняты: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,3 до 0,5 с интервалом варьирования 0,1; расход пенообразующей добавки (соотношение пенообразователя ПО-6НП : Бентонит 2 = 1 : 1), мас. % от массы цемента (X_2) в пределах от 1 до 3 с интервалом варьирования 1; удельная поверхность сырьевых компонентов, м²/кг (X_3) в пределах от 550 до 850 с интервалом варьирования 150 (таблица 4.5).

Факторы, не включенные в план, приняты постоянными, в том числе: расход суперпластификатора Elocrete – 0,2% от массы цемента; расход перлита – 5% от массы цемента; расход микрокремнезема – 10% от массы цемента.

Таблица 4.5 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
В/Т	X_1	0,3	0,4	0,5	0,1
ПО (ПО-6НП : Бентонит 2 = 1 : 1), % Ц	X_2	2	4	6	2
Удельная поверхность, м ² /кг	X_3	550	700	850	150

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Варьируемые факторы						Экспериментальные данные	
	кодированные			натуральные			Средняя плотность ρ_{cp} , кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	1	0,5	6	850	272	0,78
2	1	1	-1	0,5	6	550	326	0,51
3	1	-1	1	0,5	2	850	296	1,1
4	1	-1	-1	0,5	2	550	348	0,64
5	-1	1	1	0,3	6	850	255	0,74
6	-1	1	-1	0,3	6	550	311	0,66
7	-1	-1	1	0,3	2	850	284	0,89
8	-1	-1	-1	0,3	2	550	330	0,68
9	1	0	0	0,5	4	700	238	0,48
10	-1	0	0	0,3	4	700	269	0,71
11	0	1	0	0,4	6	700	224	0,52
12	0	-1	0	0,4	2	700	258	0,66
13	0	0	1	0,4	4	850	270	0,57
14	0	0	-1	0,4	4	550	305	0,35
15	0	0	0	0,4	4	700	233	0,52
16	0	0	0	0,4	4	700	230	0,51
17	0	0	0	0,4	4	700	231	0,51

Заформованы 17 серий пенобетонных образцов размерами 10×10×10 см. Образцы выдерживались в нормальных условиях твердения в течение 28 сут, по истечении которых определены их физико-механические показатели.

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами (средней плотностью и прочностью на сжатие) и основными факторами, проводили статическую обработку экспериментальных данных по разработанной компьютерной программе.

Полученные расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблице 4.7, расчетные значения критерия Стьюдента – в таблице 4.8.

Таблица 4.7 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии

Параметр	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	235,07	3,10	-12,80	-24,30	15,63	3,13	49,62	0,25	0,50	1,50
$R_{сж}$, МПа	0,48	-0,02	-0,08	0,12	0,13	0,13	-0,01	-0,04	0,06	-0,04

Таблица 4.8 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Параметр	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	43,23	0,77	-3,18	-6,05	2,01	0,40	6,39	0,06	-0,11	-0,33
$R_{сж}$, МПа	16,99	-0,81	-3,61	5,90	3,29	3,16	-0,04	-1,49	2,34	-1,70

При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Следовательно, к таковым относятся коэффициенты $b_1, b_4, b_5, b_7, b_8, b_9$ для средней плотности, и $b_1, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ – для прочности на сжатие. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии.

Полученные экспериментально-статические модели влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на свойства пенобетонных изделий:

$$\rho_{ср} = 235,07 + 3,10 \cdot X_1 - 12,80 \cdot X_2 - 24,30 \cdot X_3 + 15,63 \cdot X_1^2 + 3,13 \cdot X_2^2 + 49,62 \cdot X_3^2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,50 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,50 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.18)$$

$$R_{сж} = 0,48 - 0,02 \cdot X_1 - 0,08 \cdot X_2 + 0,12 \cdot X_3 + 0,13 \cdot X_1^2 + 0,13 \cdot X_2^2 - 0,01 \cdot X_3^2 - 0,04 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,04 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.19)$$

Адекватность моделей (оценка адекватности проводилась по критерию Фишера) позволяет определять параметры изготовления изделий с марками по средней плотности от $D200$ до $D300$. По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих

равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие пенобетона, представленном на рисунке 4.8.

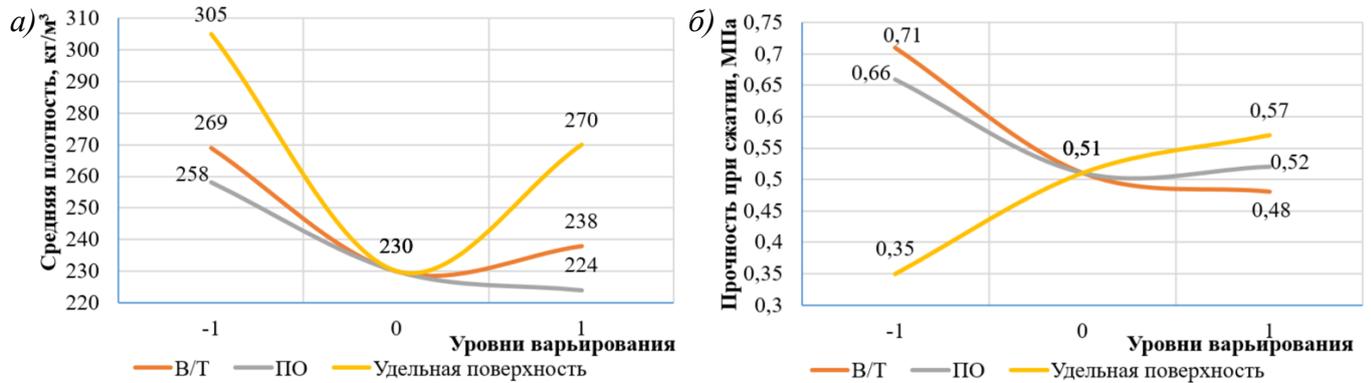


Рисунок 4.8 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) пенобетона от исследуемых факторов соответственно: В/Т, расход пенообразующей добавки и удельная поверхность сырьевых компонентов

Комплексное представление о влиянии В/Т, расхода пенообразующей добавки и удельной поверхности компонентов смеси на выходные параметры отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей выходных параметров от совокупности исследуемых факторов (рисунки 4.9-4.14).

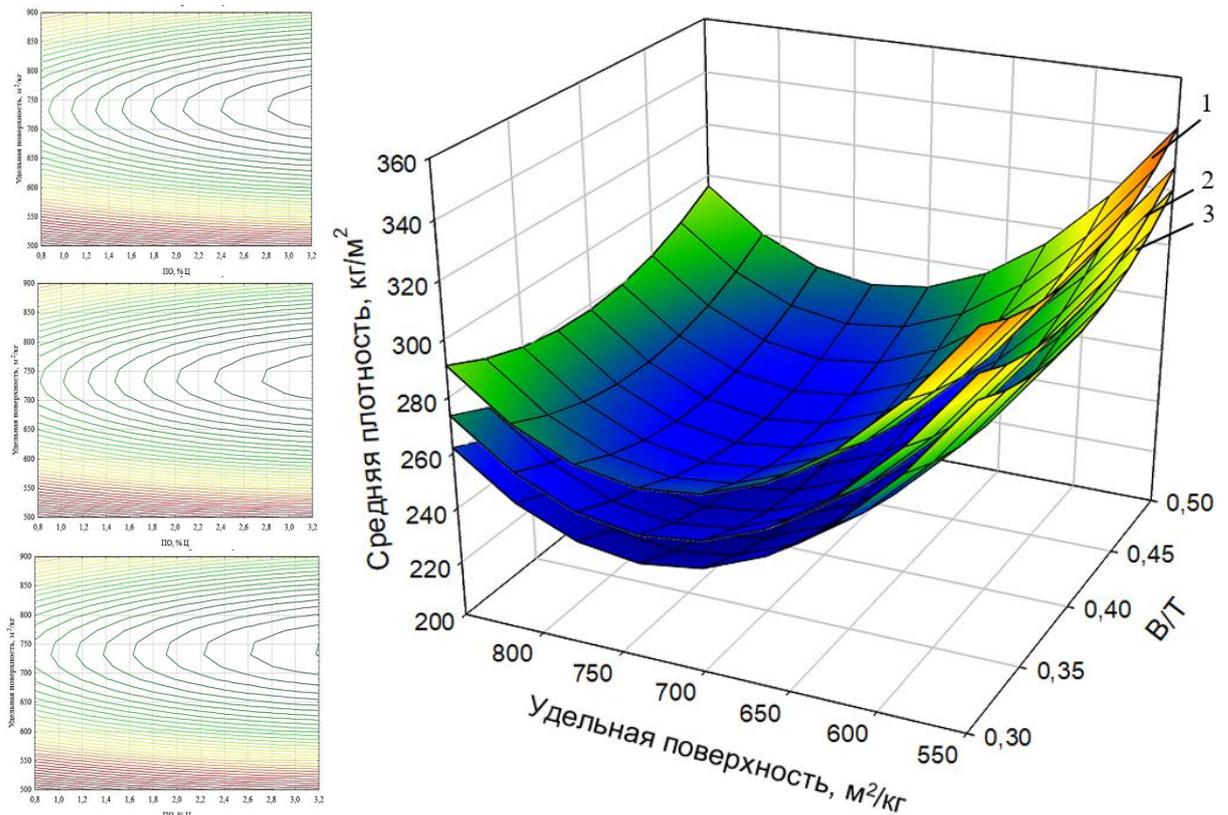


Рисунок 4.9 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,5

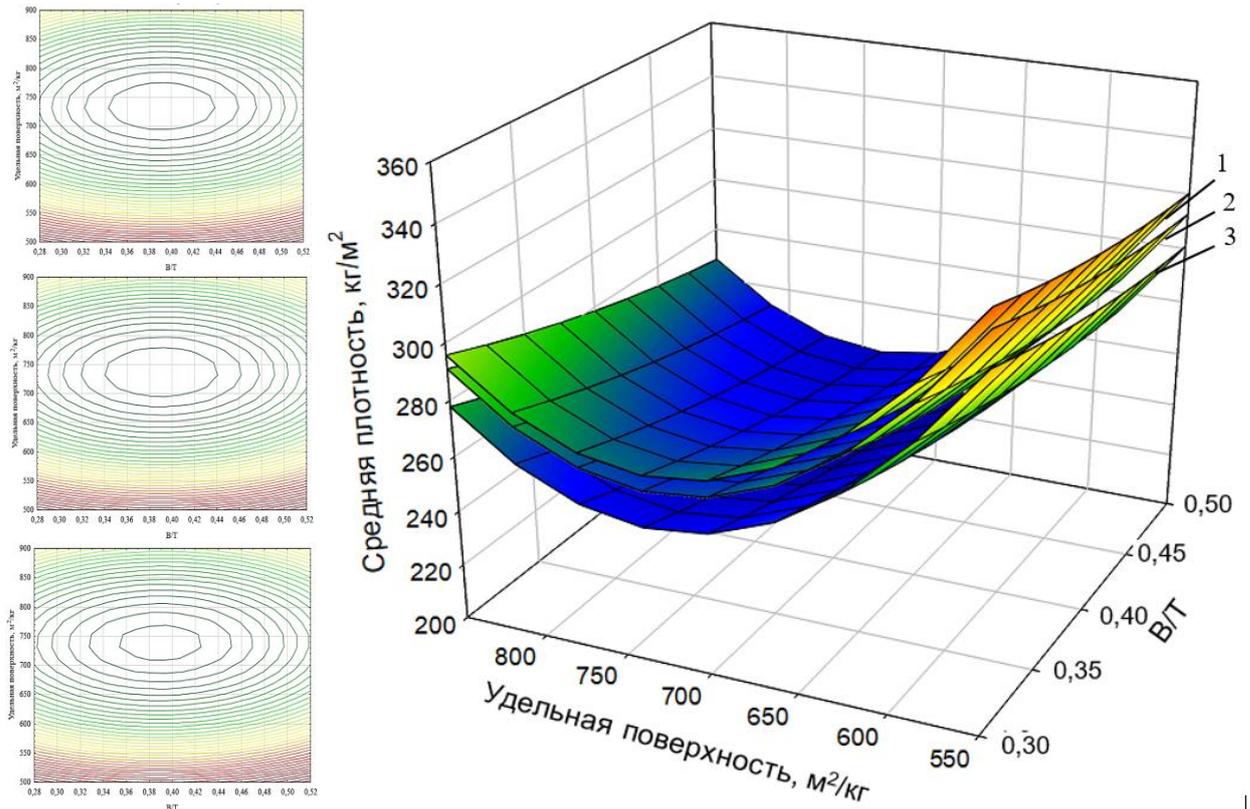


Рисунок 4.10 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – ПО = 1 %; 2 – ПО = 2 %; 3 – ПО = 3 %

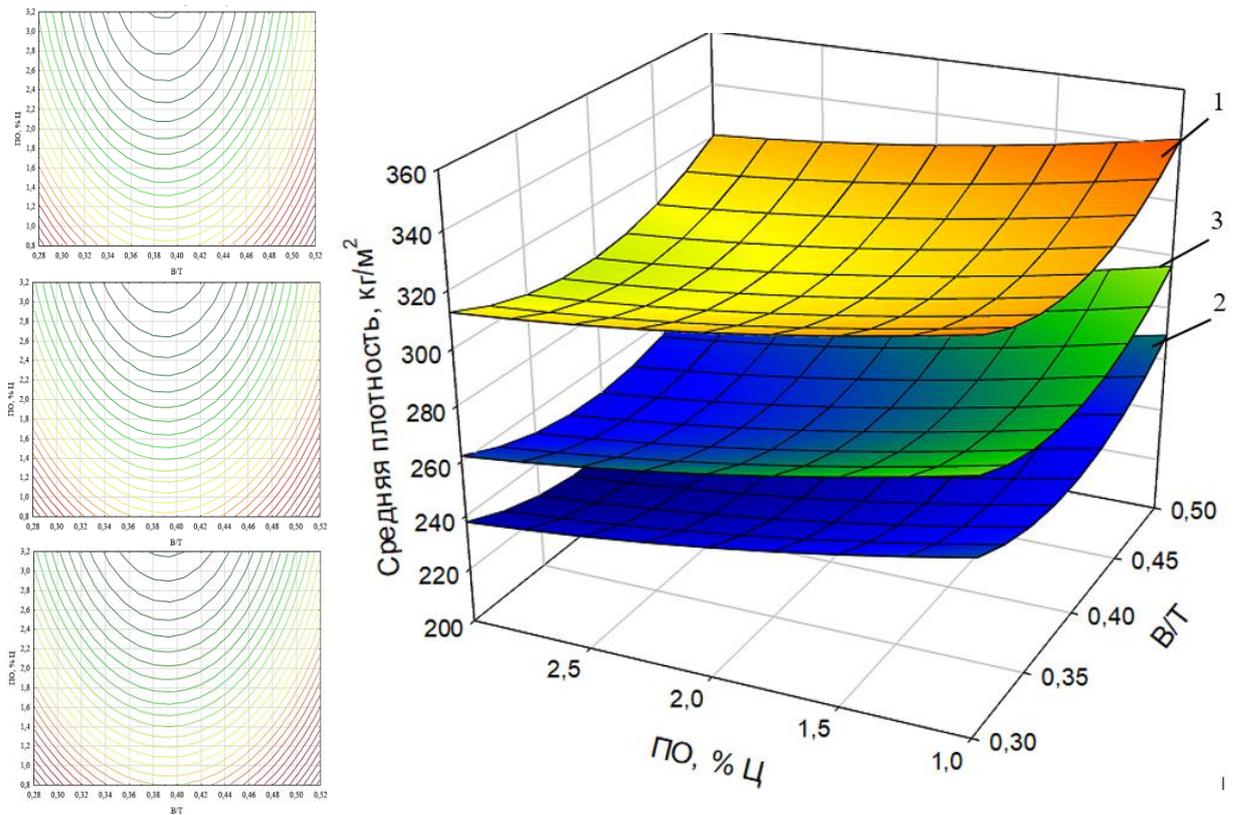


Рисунок 4.11 – Зависимости средней плотности пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – удельная поверхность = $550 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2 – удельная поверхность = $700 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – удельная поверхность = $850 \text{ м}^2/\text{кг}$

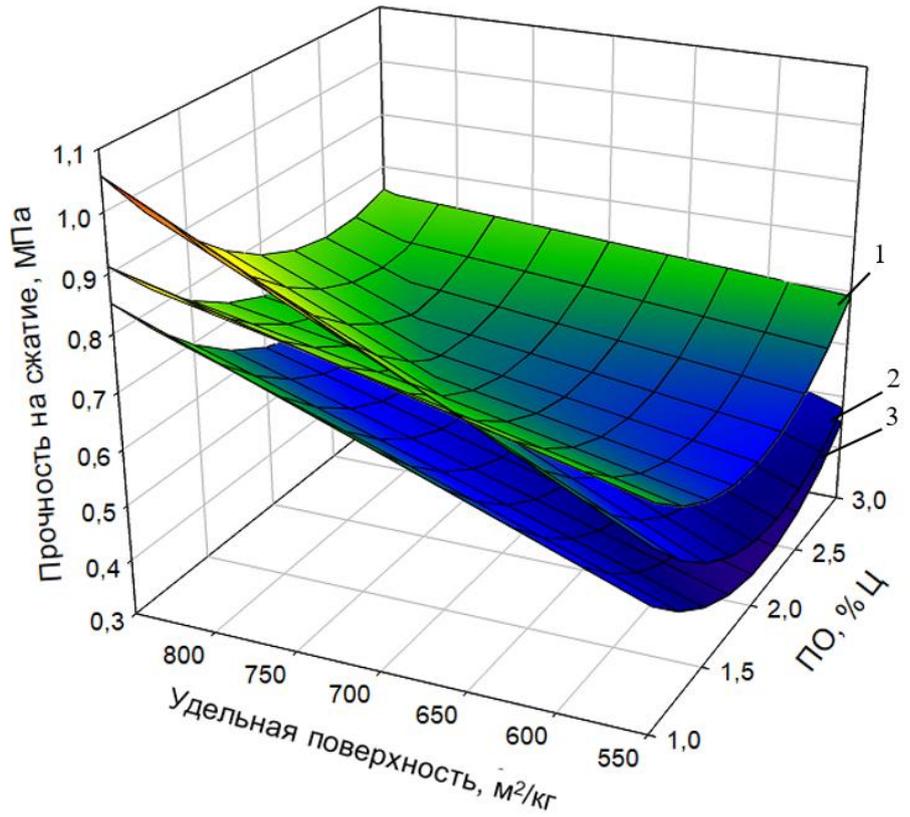
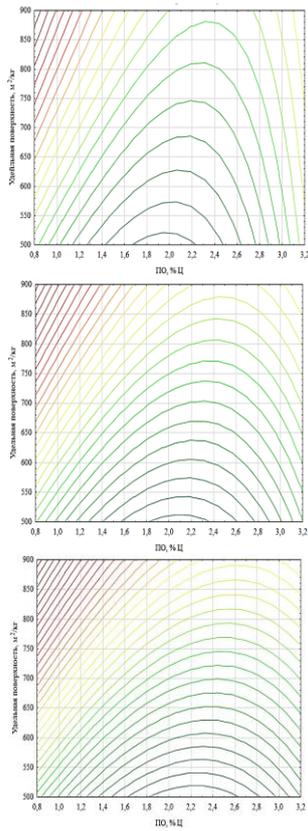


Рисунок 4.12 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,5

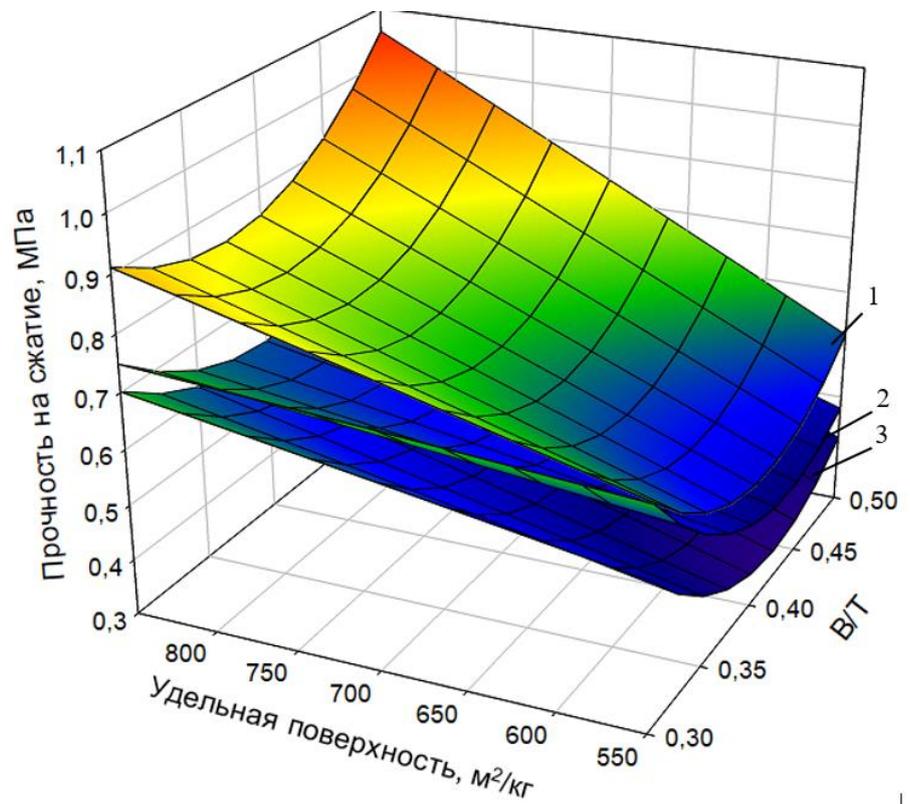
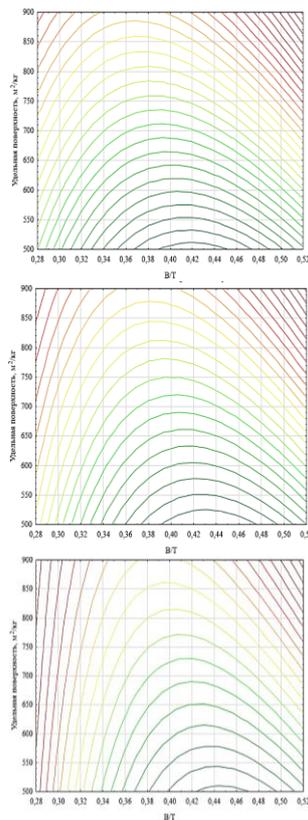


Рисунок 4.13 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – ПО = 1 %; 2 – ПО = 2 %; 3 – ПО = 3 %

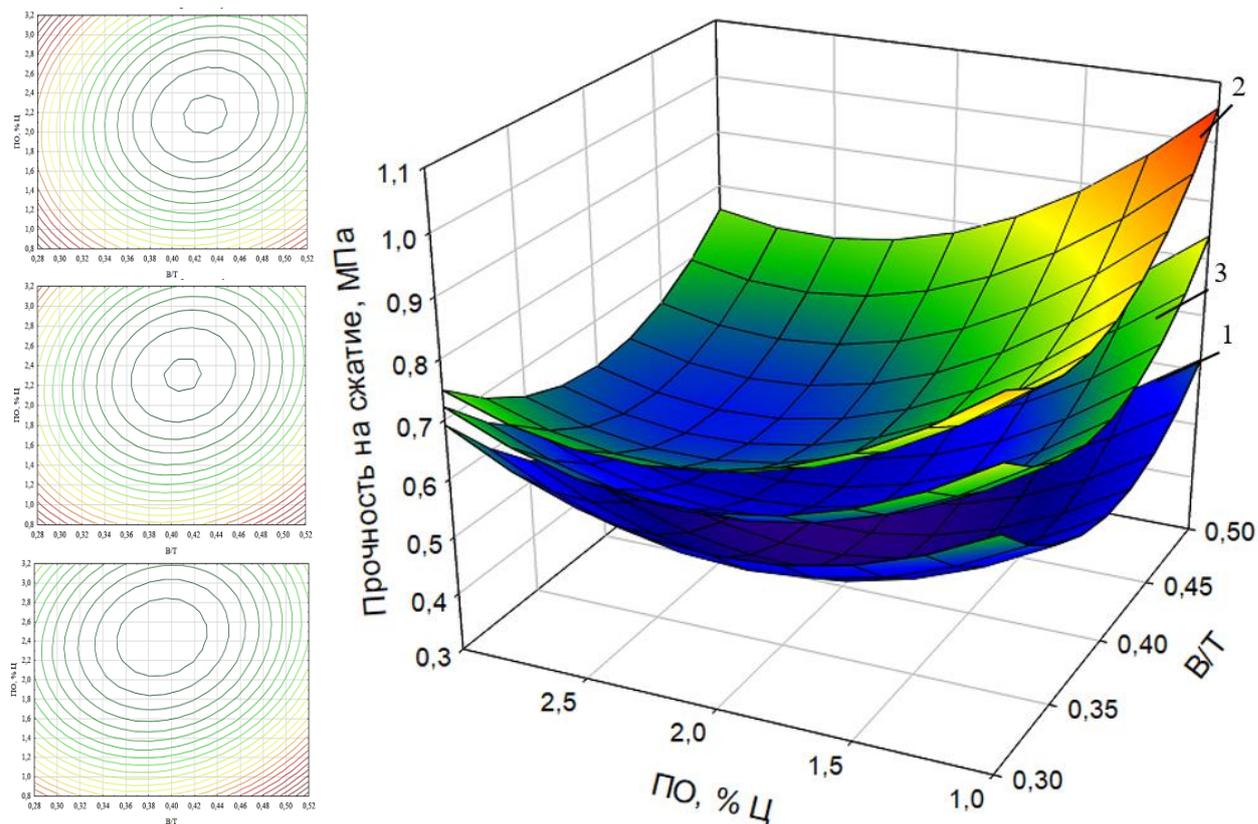


Рисунок 4.14 – Зависимости прочности на сжатие пенобетона от В/Т, расхода пенообразующей добавки (ПО) и удельной поверхности компонентов: 1 – удельная поверхность = $550 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2 – удельная поверхность = $700 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – удельная поверхность = $850 \text{ м}^2/\text{кг}$

Экспериментальные исследования выявили значимое влияние водотвердого отношения, расхода пенообразующей добавки и удельной поверхности сырьевых компонентов на свойства пенобетона. Увеличение водотвердого отношения с 0,3 до 0,5 снижает плотность на 10-20% и прочность на 15-30% из-за роста пористости. Например, при расходе пенообразователя 6% и удельной поверхности $850 \text{ м}^2/\text{кг}$ повышение водотвердого отношения с 0,3 до 0,5 уменьшает плотность с 255 до $272 \text{ кг}/\text{м}^3$ и прочность с $0,74$ до $0,78 \text{ МПа}$, что указывает на менее выраженный эффект при высокой удельной поверхности. Удельная поверхность сырья демонстрирует нелинейный эффект: повышение с 550 до $850 \text{ м}^2/\text{кг}$ при низком водотвердом отношении и расходе пенообразователя 2% увеличивает прочность с $0,68$ до $0,89 \text{ МПа}$, но снижает плотность с 330 до $284 \text{ кг}/\text{м}^3$, что связано с улучшением дисперсности компонентов.

Взаимодействие факторов усиливает их индивидуальное влияние. Комбинация высокого водотвердого отношения, расхода пенообразователя 6% и

низкой удельной поверхности приводит к минимальной прочности и высокой плотности, так как крупные поры от избытка воды и пенообразователя доминируют над структурой. Напротив, низкое водотвердое отношение, минимальный расход пенообразователя и высокая удельная поверхность обеспечивают прочность 0,89 МПа при плотности 284 кг/м³, демонстрируя, что тонкодисперсные компоненты компенсируют пористость. Экстремальные комбинации, такие как одновременное использование высокой удельной поверхности и максимального расхода пенообразователя, вызывают конфликт между уплотнением микроструктуры и порообразованием, снижая прогнозируемую прочность на 10-15% по сравнению с образцом 3 (расход пенообразователя 2%, удельная поверхность 850 м²/кг), где прочность достигает 1,1 МПа.

Для пенобетона марки по средней плотности *D300* наиболее предпочтительны образцы 5, 3 и 7 (таблица 4.6). Образец 5 (водотвердое отношение 0,3, расход пенообразователя 6%, удельная поверхность 850 м²/кг) при плотности 255 кг/м³ и прочности 0,74 МПа. Образец 3 (водотвердое отношение 0,5, расход пенообразователя 2%, удельная поверхность 850 м²/кг) выделяется рекордной прочностью 1,1 МПа при плотности 296 кг/м³. Образец 7 (водотвердое отношение 0,3, расход пенообразователя 4%, удельная поверхность 850 м²/кг) демонстрирует сбалансированные свойства: плотность 284 кг/м³ и прочность 0,89 МПа. Для марки по средней плотности *D200* рекомендованы образцы 11 и 15. Образец 15 (водотвердое отношение 0,4, расход пенообразователя 4%, удельная поверхность 700 м²/кг) при плотности 233 кг/м³ и прочности 0,52 МПа.

Проведенное исследование подтвердило, что математическое планирование эксперимента эффективно для оптимизации составов пенобетона, обеспечивая прогнозируемость свойств материала. Разработаны составы теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей различного функционального назначения с целью оценки влияния содержания сырьевых компонентов смеси на эксплуатационные характеристики пористого композита.

4.2. Свойства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей и рекомендации по их применению

Исходя из результатов проведенных исследований (см. п. 4.1), рассмотрены составы теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей, представленные в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Составы сухих ячеистобетонных смесей и физико-механические характеристики пенобетонов на их основе

№ п/п	Цемент, %	Перлит, %	Микрокремнезем, %	Пенообразователь, % от Ц	Бентонит, % от Ц	Elocrete, % от Ц	Рекоменд. В/Т	Удельная поверхность, м ² /кг
Разработанные составы								
1	85	10	5	3	3	0,2	0,4	700
2	85	5	10	2	2	0,2	0,4	700
3	85	5	10	1	1	0,2	0,5	850

Определены физико-механические характеристики разработанных составов.

Методика оценки морозостойкости пенобетона реализована в соответствии с требованиями ГОСТ 31359. Для проведения испытаний от каждой серии образцов были отобраны 24 кубических фрагмента с геометрическими параметрами 100×100×100 мм. Процедура насыщения влагой включала поэтапное погружение образцов: первичное – на 1/3 высоты с экспозицией 8 ч, вторичное – на 2/3 высоты с аналогичной выдержкой, финальное – полное погружение на 24 ч. Основные образцы, предназначенные для анализа изменения прочностных и массовых характеристик после циклического замораживания-оттаивания, предварительно взвешивались и размещались в климатической камере с температурным режимом –18 °С.

Цикл испытаний состоял из 4-часовой криостатической фазы (замораживание) и 18-часовой термостатической фазы (оттаивание) при температуре +18±2 °С и относительной влажности 90%. Контроль состояния образцов осуществлялся визуально и посредством механических испытаний на сжатие после каждых 5 циклов. Критерием соответствия марки бетона установленным нормативам являлось сохранение прочности (допустимое снижение ≤15%) и массы (потеря ≤5%) после заданного числа циклов.

Экспериментально подтверждено, что образцы пенобетона сохранили целостность структуры после 50 циклов, что позволило присвоить материалу марку морозостойкости *F50*. Результаты исследования морозостойкости образцов пенобетона представлены в таблицах 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Результаты исследований морозостойкости пенобетона по критерию прочности

№ состава (по табл. 4.9)	Прочность на сжатие в МПа (перед чертой) и в % (после черты) при переменном замораживании и оттаивании в циклах				
	0	15	25	35	50
1	0,42 / 100	0,40 / 95,2	0,38 / 89,5	0,37 / 87,1	0,36 / 84,4
2	0,77 / 100	0,75 / 97,4	0,72 / 93,5	0,70 / 90,9	0,68 / 88,5
3	1,22 / 100	1,20 / 98,4	1,17 / 95,9	1,14 / 93,4	1,12 / 91,8

Таблица 4.11 – Результаты исследований морозостойкости пенобетона по критерию потери массы

№ состава (по табл. 4.9)	Масса образца в г (перед чертой) и в % (после черты) при переменном замораживании и оттаивании в циклах				
	0	15	25	35	50
1	380 / 100	375 / 98,7	368 / 96,8	365 / 96,1	364 / 95,8
2	450 / 100	446 / 99,1	442 / 98,2	440 / 97,8	437 / 97,2
3	500 / 100	498 / 99,6	495 / 99,0	493 / 98,6	492 / 98,5

Теплофизические характеристики пенобетона в сухом состоянии исследованы согласно ГОСТ 7076. Установлено, что коэффициент теплопроводности материала коррелирует с его средней плотностью и морфологией поровой структуры, соответствуя нормам ГОСТ 25485-2019. Паропроницаемость образцов с оптимизированной макропористой структурой определена по методике ГОСТ 25898-2020 на образцах 100×100×30 мм.

Полученные значения коэффициента паропроницаемости подтвердили соответствие материала требованиям по сопротивлению диффузии водяного пара.

Изучение усадочных деформаций выполнено в соответствии с ГОСТ 25485. Для испытаний использовались три призматических образца размером 40×40×160 мм, изготовленных методом распиловки контрольных пенобетонных блоков.

Предварительная кондиционизация образцов проводилась в герметизированных эксикаторах с поддержанием влажностного режима над поверхностью воды. Метрические измерения усадки осуществлялись с использованием индикатора часового типа, закрепленного на стальных реперах, смонтированных на торцевых гранях образцов. Критерием завершения эксперимента являлась стабилизация массовых и линейных параметров образцов в условиях естественной сушки.

Разработанные составы и результаты комплексного анализа физико-механических свойств теплоизоляционных пенобетонов по сравнению с товарным составом сухой смеси для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D400$ (производства ООО «Совби») систематизированы в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Физико-механические свойства пенобетона

№ п/п	Цемент, %	Перлит, %	Микрокремнезем, %	Пенообразователь, % от Ц	Бентонит, % от Ц	Еюсcrete, % от Ц	Рекомед. В/Г	Удельная поверхность, $M^2/KГ$	Средняя плотность ρ_{cp} , $KГ/M^3$	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	Марка по морозостойкости	Усадка, мм/м
Пенобетон марки по средней плотности $D400$ на основе товарной смеси															
1	100	-	-	1	-	1	0,43	310	400	$D400$	1,1	0,085	0,24	-	1,7
Разработанные составы															
2	85	10	5	3	3	0,2	0,4	700	202	$D200$	0,50	0,061	0,23	$F35$	0,54
3	85	5	10	2	2	0,2	0,4	700	269	$D250$	0,71	0,066	0,20	$F50$	0,45
4	85	5	10	1	1	0,2	0,5	850	296	$D300$	1,17	0,070	0,18	$F50$	0,37

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность применения 10% микрокремнезема и 5% вспученного перлитового песка в качестве минеральной добавки для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D300$; 5% микрокремнезема и 10% вспученного перлитового песка в качестве минеральных добавок для теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности $D200$ и $D250$, рекомендуемых для утепления стен с несущим каркасом, чердачных перекрытий, полов по лагам, плоских кровель и мансард.

4.3. Исследование микроструктуры теплоизоляционных пенобетонов

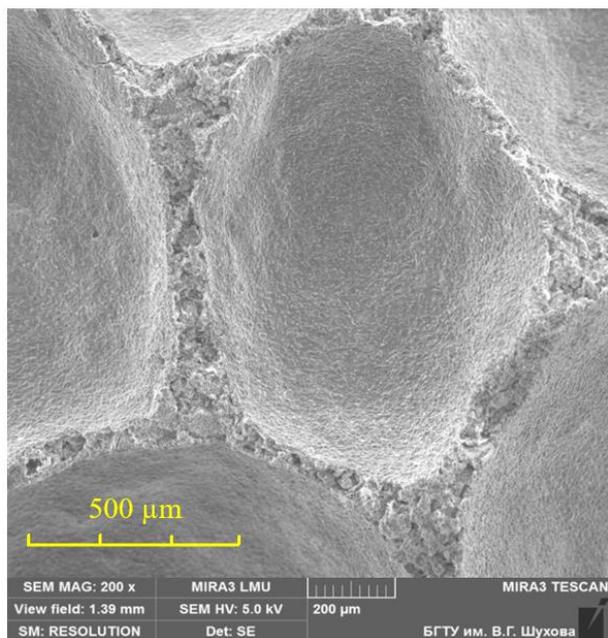


Рисунок 4.15 – Микроструктура образца контрольного состава (цемент + ПО)

Анализ микроструктуры исследуемых пенобетонных образцов, выполненный методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), выявил существенные различия в распределении пор, морфологии гидратных фаз и взаимодействии добавок с цементной матрицей. В контрольном составе наблюдается неоднородная структура с крупными порами (200-500 мкм), окруженными игольчатыми кристаллами этtringита длиной 5-10 мкм и чешуйками

портландита (рисунок 4.15). Межпоровые перегородки имеют рыхлую текстуру с выраженными микротрещинами, что объясняется отсутствием добавок, стабилизирующих структуру.

Микроструктура пенобетона марки по средней плотности $D300$ демонстрирует выраженную зависимость от водоцементного отношения (В/Т) и содержания микрокремнезема. В составе с В/Т = 0,5 и 10% микрокремнезема преобладают крупные поры (50-150 мкм), окруженные межпоровыми перегородками толщиной 10-20 мкм (рисунок 4.16, а). Перегородки отличаются неоднородной плотностью: участки с высокой упаковкой частиц чередуются с зонами, содержащими внутренние микропоры (5-10 мкм). Микрокремнезем, благодаря ультрадисперсной фракции (0,1-1 мкм), заполняет часть микропор, уплотняя структуру, однако избыток воды способствует формированию изолированных макропор (>200 мкм), снижающих механическую целостность.

В марках по средней плотности $D200$ доминирование перлита формирует открытую макропористую структуру с порами 100-300 мкм (рисунок 4.16, б). Введение 5% микрокремнезема частично компенсирует эти недостатки: средний

размер пор снижается до 50-150 мкм, а толщина перегородок увеличивается до 10-20 мкм за счет заполнения микропор (1-5 мкм). Микрокремнезем создает армирующий слой на поверхности перлитовых гранул, улучшая адгезию, однако макропоры остаются доминирующими, ограничивая механическую стабильность.

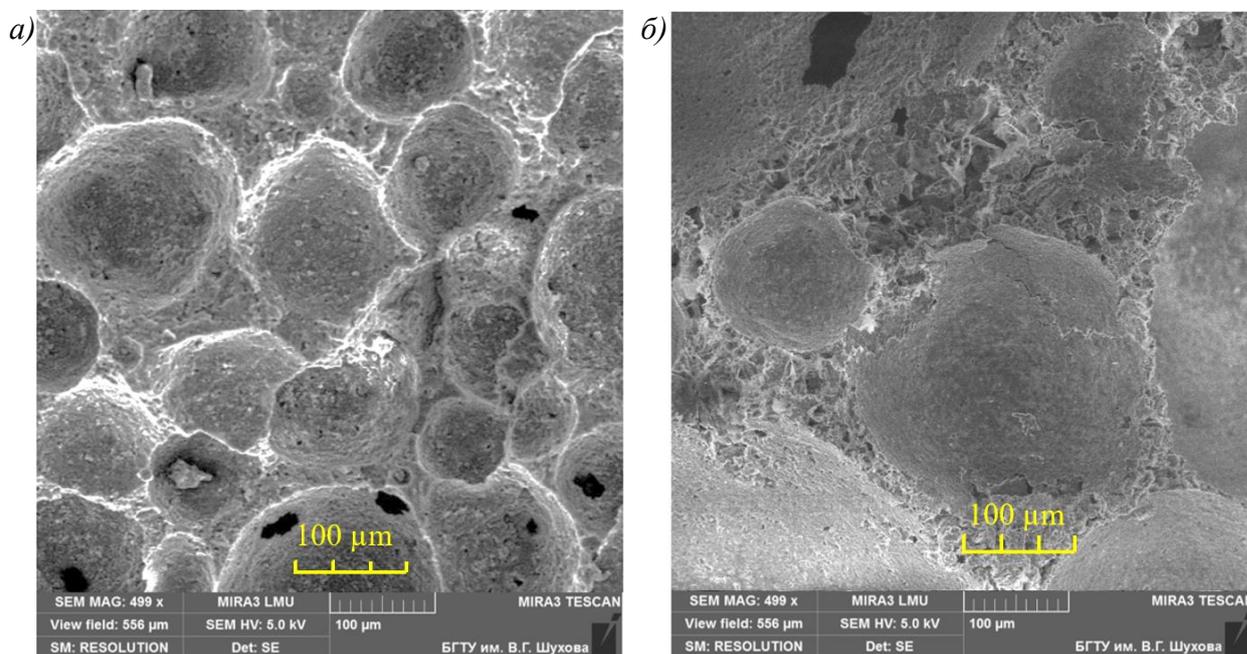


Рисунок 4.16 – Микроструктура образцов пенобетона: *а* – марки по средней плотности $D300$; *б* – марки по средней плотности $D200$

Для марок по средней плотности $D250$ ключевым фактором становится комбинация перлита и микрокремнезема (рисунок 4.17). При содержании 5% перлита и 10% микрокремнезема формируется иерархическая поровая структура: мезопоры (20-50 мкм) связаны с частицами перлита, а микропоры (2-10 мкм) равномерно распределены в межпоровых перегородках толщиной 10-25 мкм. Микрокремнезем заполняет пустоты между перлитовыми гранулами, создавая непрерывную армирующую сеть, однако на границах перлита сохраняются зоны локальной пористости (5-15 мкм) со сниженной адгезией. Уменьшение доли микрокремнезема до 5% приводит к росту среднего размера пор в перегородках (10-30 мкм) и увеличению их толщины (15-60 мкм). Рыхлая структура перегородок с каналами дренажа и ослабленными зонами вокруг перлита провоцирует образование трещин под нагрузкой.

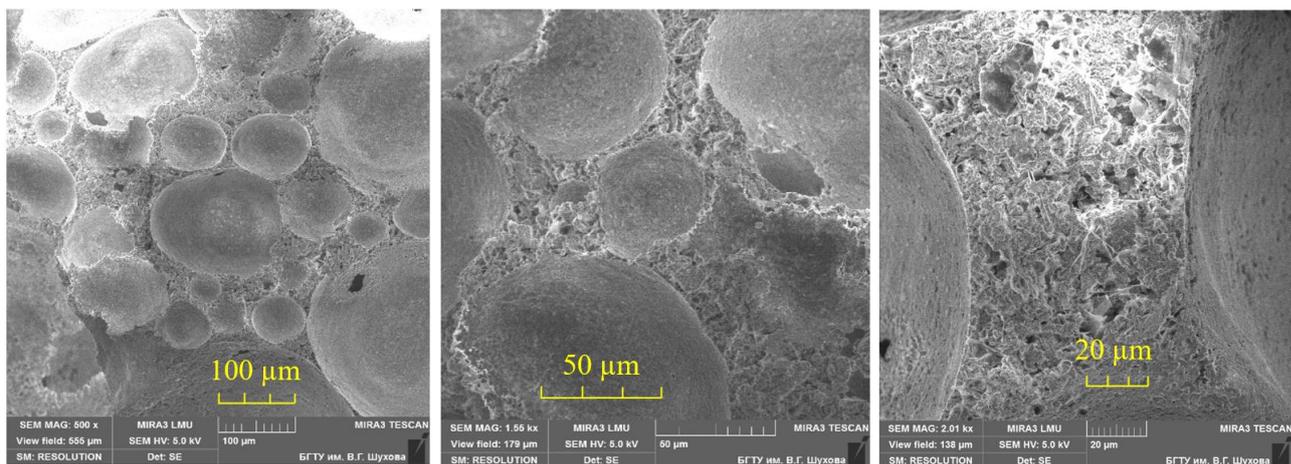


Рисунок 4.17 – Микроструктура образцов пенобетона марки по средней плотности D_{250}

Интеграция бентонита в цементную матрицу, основанная на включении природного алюмосиликата с преобладанием монтмориллонита, обеспечивает структурные и функциональные модификации, аналогичные взаимодействию перлита и микрокремнезема, но с уникальными особенностями. Микроструктура бентонита (рисунок 2.2) включает ультрамикрoагрегаты пластинчатой и листообразной формы размером до 10 мкм, состоящие из частиц алюмосиликата, образующих микро- и макроагрегаты (до 100 мкм). Кристаллическая структура бентонита, основанная на слоистой архитектуре из кремний-кислородных тетраэдров и октаэдров с катионами Al^{3+} , Mg^{2+} или $Fe^{2+/3+}$, обеспечивает высокую удельную поверхность (600-800 м²/г) и катионообменную способность.

При внедрении в цементную матрицу бентонит проявляет пуццолановую активность: аморфные SiO_2 и Al_2O_3 реагируют с портландитом, образуя фазы С-S-Н и С-А-Н геля. Параллельно ионообменные процессы (замещение Na^+/Ca^{2+} на Ca^{2+}) стабилизируют структуру и снижают риск сульфатной коррозии.

Таким образом, комбинация микрокремнезема, перлита и суперпластификаторов позволяет проектировать пенобетоны с заданными свойствами. Оптимизация состава требует баланса между пористостью, плотностью перегородок и химической активностью компонентов, что подтверждает эффективность комплексного подхода к модификации структуры.

4.4. Разработка системы контроля и оценки качества макропористой структуры ячеистых бетонов

4.4.1. Оптимизация метода анализа изображений для оценки пористой структуры ячеистых бетонов

Традиционные геометрические характеристики структуры пор в экспериментальных и имитационных исследованиях ячеистых бетонов фокусируются на пористости, удельной площади поверхности пор, распределении размеров пор и на корреляционных функциях. Распределение размеров пор математически недостаточно определено. Поэтому вместо того, чтобы рассматривать различные размеры пор как основной источник случайности в пористой среде, локальная теория пористости [191] предлагает рассматривать саму пористость как случайную величину. Локальная теория пористости охватывает две геометрические характеристики, а именно локальное распределение пористости и локальную вероятность перколяции.

Гетерогенность не является внутренним свойством материала, а является концепцией стохастического моделирования [192]. Средние значения произвольного трехмерного геометрического параметра бетона будут похожими, если они получены из больших объемов материала. В связи с чем данные объемы определяются как однородные для самого параметра. Различия между средними значениями будут увеличиваться с уменьшением размера объемов образца. Величина рассеяния выражается в стандартном отклонении или коэффициенте вариации.

Объем образца, для которого стандартное отклонение в глобальных значениях выбранного геометрического параметра все еще находится на приемлемом уровне, называется репрезентативным элементом объема для этого конкретного параметра; этот репрезентативный элемент объема считается однородным относительно того же параметра. Те же рассуждения применяются, когда секции материала схожего размера используются для оценки двумерной информации по определенному геометрическому параметру. В этом случае один

из элементов площади одинакового размера, дающий приемлемый уровень разброса в геометрических данных, определяется как однородный для соответствующего двумерного геометрического параметра и обозначается репрезентативным элементом площади. Таким образом, степень неоднородности зависит для заданного размера выборки от типа геометрического параметра и от размера выборки для конкретного геометрического параметра [193].

Выборка размеров репрезентативного элемента объема (или площади) необходима для оценки объемных характеристик. Подход локальной теории пористости имеет дело с локальной пористостью и с разбросом среди данных измерений на субмакроскопическом уровне. Для этого поры представляются в достаточно большом элементе объема между микроскопическим уровнем, где визуализируются отдельные поры, и макроскопическим уровнем.

Следствием концепции стохастической гетерогенности является то, что сравнение различных популяций требует работы с аналогичной чувствительностью зондирования. Следовательно, соотношение размеров образца и репрезентативного элемента объема должно быть постоянным. Только при таких условиях влияние гетерогенности нормализуется и отделяется от средних оценок.

Прямая характеристика с помощью локальной теории пористости возможна только на основе надежной трехмерной модели структуры пористой среды. Для существующих образцов ячеистых бетонов данные модели не могут быть получены из доступных двумерных изображений сечений. Следовательно, трехмерный анализ напрямую не применим к изображениям сканирующей электронной микроскопии. Поэтому двумерный анализ локальной пористости возможно применить как аналог трехмерного анализа. Он упрощает вычисления и сохраняет характеристики структуры пор, непосредственно полученные из цементного теста.

При структурных исследованиях необходимо добавлять дополнительные этапы отбора образцов для исследования пористой структуры поверхности

ячеистого бетона. Образцы разрезаются для получения сечений, местоположение и ориентация которых должны быть рандомизированы. Сечения и связанные с ними изображения, которые можно визуализировать (в основном искусственными средствами) на поверхности сечения, имеют размеры, меньшие, чем у образца, которые представляют собой набор различных местоположений и ориентаций тела образца. Аналогично расположенные и ориентированные изображения сечений повторных экспериментов показывают разброс между сечениями на так называемом расширенном этапе отбора проб, что в равной степени относится к результату операции усреднения по набору сечений, рандомизированных по местоположению и ориентации.

Изображения сечений в целом слишком велики, чтобы подвергаться количественной микроскопии. Вместо этого для этой цели используются поля, значительно меньшие, чем площадь сечения. Поля подвергаются стереологическим методам количественного анализа изображений. Процедура может повторяться случайным образом несколько раз, выявляя различия между данными. Оптическое увеличение, необходимое для визуализации микроструктуры материала, определяет как микроструктурный уровень, отображаемый полем, так и геометрическую структуру репрезентативного элемента объема. Следовательно, оптическое разрешение и наблюдаемый уровень микроструктуры тесно связаны: более высокие плотности геометрических параметров будут наблюдаться при более высоком оптическом разрешении. Данный фактор не определяет свойства материала, но является прямым отражением последовательности проведения исследований. Надежность оценки поведения материала (в терминах наблюдаемых геометрических параметров материала) во внешнем режиме зависит от общего разброса, т.е. отражающего многоступенчатый процесс выборки.

Наблюдения должны предоставлять трехмерную информацию о структуре материалов. Однако непрозрачные материалы, такие как ячеистые бетоны, не позволяют наглядно получить трехмерную структуру материала. Поэтому для

этой цели следует применять геометрические статистические инструменты, поскольку они предоставляют средства для оценки трехмерных геометрических параметров агрегатного состояния на основе одномерных или двумерных наблюдений [193].

Доля площади порового пространства в измерительном квадрате со стороной L является несмещенной оценкой доли объема пор, т.е. пористости в измерительной ячейке [194]. Вероятность локальной перколяции в квадрате измерения незначительна, поскольку вероятность перколяции пористости намного ниже в двумерном сечении, чем в трех измерениях.

В качестве альтернативы трехмерного анализа пористости возможно применение двумерного анализа, который объединен с количественным анализом изображений сечений образцов для характеристики 3D-распределения пористости и вероятности перколяции в ячеистом бетоне.

Значения пористости ячеистого бетона зависит от L , выявляя два конкурирующих эффекта. При малых L локальные геометрии просты в довольно малом поле, но корреляции между полями сильны. При L , равном размеру образца, значение пористости не содержит сложных геометрических корреляций, поскольку имеется только одна измерительная ячейка. При больших L локальные геометрии статистически не коррелируют, но каждая из них почти так же сложна, как и все поровое пространство. Существует промежуточный масштаб длины, при котором, с одной стороны, локальные геометрии относительно просты, тогда как, с другой стороны, функция распределения отдельных ячеек имеет достаточно нетривиальное геометрическое содержание, чтобы быть хорошим приближением исследуемой структуры. Следовательно, наблюдения на разных уровнях микроструктуры будут давать в соответствии с теорией систематически различную информацию о степени неоднородности.

Таким образом, анализ локальной пористости в ячеистом бетоне представляет собой сложный процесс, который требует учета множества факторов, связанных с геометрией и распределением пор. Традиционные методы

исследования, сосредоточенные на геометрических характеристиках пор, не всегда обеспечивают достаточную точность из-за математической неопределенности в распределении размеров пор. В этом контексте локальная теория пористости предлагает более глубокое понимание, рассматривая пористость как случайную величину и акцентируя внимание на локальных характеристиках, таких как распределение пористости и вероятность перколяции.

Гетерогенность материала не является фиксированной характеристикой, а зависит от размера выборки и типа геометрического параметра. Это подчеркивает важность выбора репрезентативного элемента объема для адекватного анализа. Применение анализа на субмакроскопическом уровне позволяет более точно оценить локальную пористость и разброс данных, что критически важно для понимания механических свойств ячеистого бетона.

Однако, несмотря на преимущества трехмерного анализа, существующие ограничения в получении трехмерных моделей из двумерных изображений требуют использования аналогичных подходов для двумерного анализа. Это позволяет сохранить важные характеристики структуры пор и упрощает вычисления. В конечном итоге, более точный анализ локальной пористости требует комплексного подхода, включающего как количественные методы анализа изображений, так и статистические инструменты для оценки трехмерных параметров.

С целью установления минимального размера измерительного квадрата (L), обеспечивающего достоверную оценку пористости, проведено исследование зависимости погрешности измерений от соотношения L/d , где d – средний размер пор. Анализ проводился для пенобетонов марки по средней плотности $D200$ и $D300$, отличающихся плотностью и структурой пор. За основу взяты макроструктурные изображения с последующей обработкой программными инструментами. Минимальный размер квадрата L_{min} определен как диаметр одной поры ($L = d$), после чего площадь анализа последовательно увеличивалась до $L = 10d$ с шагом, кратным d . На каждом этапе вычислялось отклонение

измеренной пористости от эталонного значения ($P_{\text{реф}}$), принятого за 100% при максимальном размере квадрата ($L = 10d$). Результаты исследования представлены на рисунке 4.18.

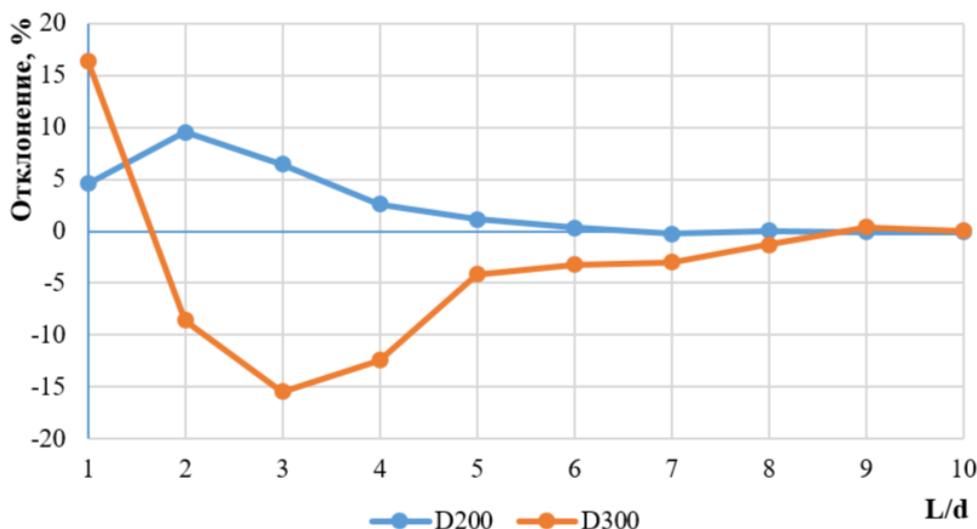


Рисунок 4.18 – Зависимость отклонения пористости от размера измерительного квадрата L/d

На основании данных, представленных на рисунке 4.18, можно сделать вывод о том, что ключевым фактором, влияющим на точность, является степень усреднения неоднородностей поровой структуры. Для пенобетонов марки по средней плотности $D200$, где преобладают относительно равномерно распределенные поры, стабилизация погрешности наступает быстрее, чем для пенобетонов марки по средней плотности $D300$, в котором присутствуют как микропоры, так и макропоры, создающие локальные зоны с резко отличающейся пористостью. Отрицательные отклонения, зафиксированные для $D300$ на промежуточных этапах ($L = 2d \dots 7d$), могут быть связаны с систематической недооценкой вклада крупных пор, которые не попадают в поле зрения при малых L , но начинают усредняться при дальнейшем увеличении площади анализа.

Практические выводы исследования заключаются в следующем: для пенобетона марки $D200$ минимальный размер измерительного квадрата составляет $7d$, что обеспечивает погрешность в пределах $\pm 0,3\%$, а для $D300$ требуется увеличение L до $8d$ для достижения погрешности $\leq 1,5\%$. Для задач, требующих максимальной точности (например, при сертификации материалов),

рекомендуется использовать $L = 10d$, где отклонение не превышает 0,1%. Полученные данные позволяют оптимизировать процедуру макроструктурного анализа, сократив время обработки изображений без потери достоверности результатов, а также могут быть учтены при разработке стандартизированных методов оценки пористости ячеистых бетонов.

4.4.2. Исследование параметров поверхностной пористости теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Структура теплоизоляционных пенобетонов, определяемая распределением пор по размерам, форме и пространственной ориентации, оказывает ключевое влияние на их физико-механические свойства, включая прочность, теплопроводность и морозостойкость. В связи с этим метод анализа изображений представляет собой перспективную альтернативу, позволяющую проводить неразрушающий количественный анализ поверхностной пористости с высокой точностью.

Традиционные методы оценки пористости обладают существенными ограничениями: разрушающий характер испытаний, высокая трудоемкость и невозможность визуализации макроструктуры. Однако методы, использующие красящие составы, обладают значительным недостатком: поверхностное натяжение пигментной смеси, основанной на черной водорастворимой гуаши или других красящих составах, мешает проникновению пигмента в мелкие поры, что снижает точность определения параметров пористости ячеистого бетона. Таким образом, целью исследования стала разработка и описание метода определения пористости ячеистых бетонов с использованием анализа изображений.

В разработанном авторами методе определения поверхностной пористости ячеистых бетонов предлагается выполнить предварительную обработку поверхности материала, включающую шлифовку для достижения ровной однородной поверхности и продувку компрессором [180, 181]. Для проведения исследования использовались наборы фрагментов поверхности пенобетона марки по средней плотности $D200-D300$ размером 15×15 мм каждый (рисунок 4.19, *a*).

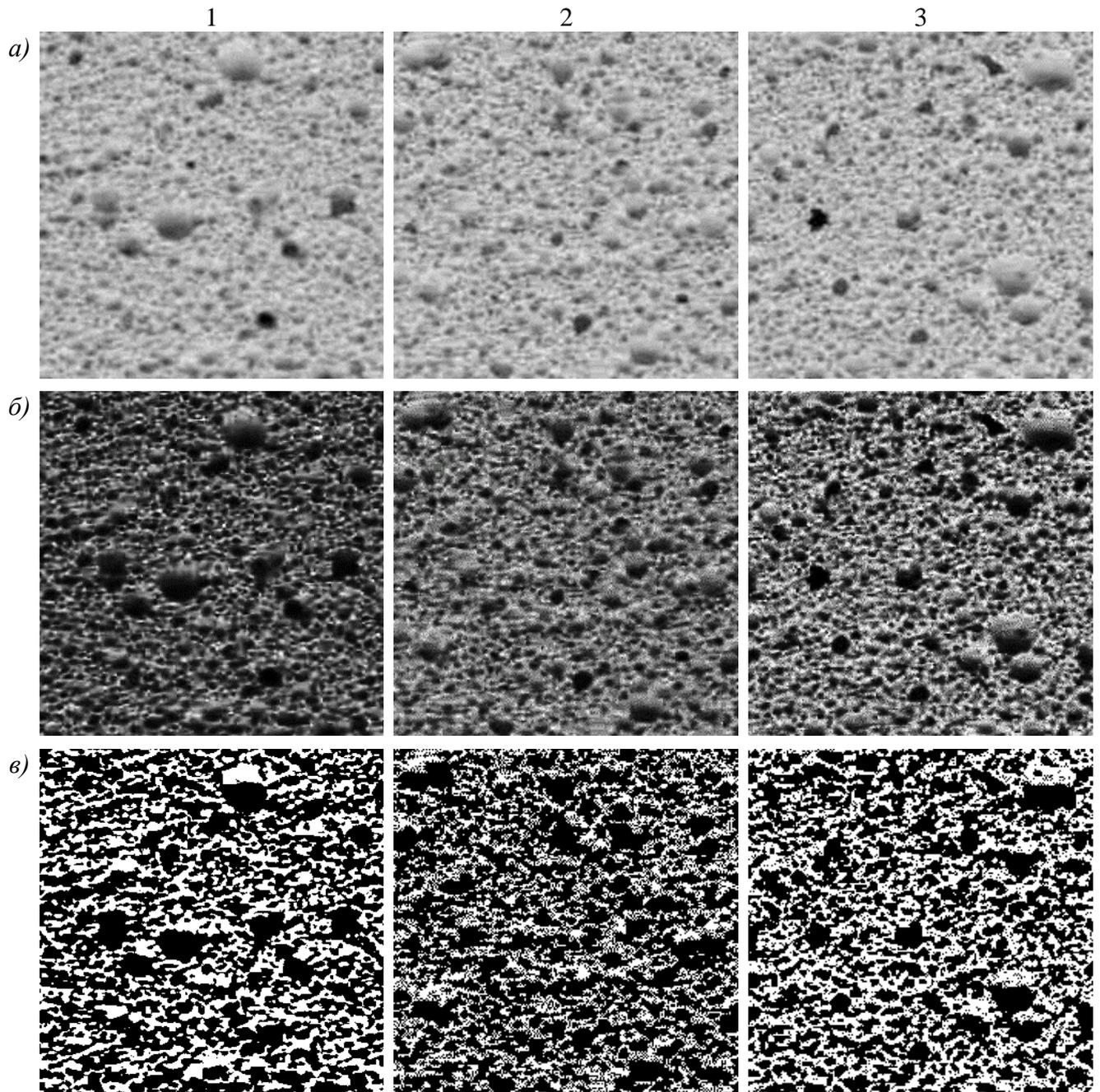


Рисунок 4.19 – Поверхность разреза образцов теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D200$: *a* – натуральный вид; *б* – поверхность разреза с порами, заполненными аморфным углеродом; *в* – оцифрованный вид поверхности с пикселями, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету; 1-3 – номера образцов

Поры поверхности разреза материала после продувки заполняются измельченным аморфным углеродом, в данном случае измельченным древесным углем (рисунок 4.19, б). Применение аморфного углерода в качестве наполнителя пор обусловлено высокой дисперсностью его частиц, позволяющей наиболее качественно заполнить поры поверхности разреза ячеистого бетона в отличие от пигментных смесей на водной основе, поскольку поверхностное натяжение воды

в растворе препятствует попаданию пигмента в мелкие поры. При использовании пигментной смеси на основе черной водорастворимой гуаши после заполнения пор необходима сушка, повторная шлифовка и повторная продувка поверхности разреза. Данные этапы усложняют предварительную обработку поверхности материала, при этом повторная шлифовка может открыть поры, не заполненные пигментной смесью после первой шлифовки. При использовании измельченного аморфного углерода в качестве заполнителя пор нет необходимости в сушке, повторной шлифовке и продувке поверхности.

Затем производится оцифровка поверхности с использованием цифровой фотокамеры при освещении поверхности ячеистого бетона световыми лучами, падающими под углом к поверхности с разных сторон.

Полученное цифровое изображение импортируется в графический редактор для последовательного сравнения интенсивности каждой из трех цветовых компонентов: красной, зеленой и синей, для каждого пикселя изображения. Формируются пиксели поверхности пенобетона, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету (рисунок 4.19, в).

Для оценки корректности полученных результатов в рамках использования метода анализа изображений проведено исследование поверхностной пористости образцов пенобетона без заполнения пор красящим составом с применением программы ImageJ, включающей в себя все необходимые функции для цифровой обработки изображений [195]. Для обработки и анализа характеристик макропористой структуры поверхности пенобетона в программе ImageJ использовался следующий алгоритм:

- преобразование изображения в 8-битное для повышения контрастности;
- устранение случайных шумов (появляющихся из-за дефектов поверхности и случайных связей пор) с помощью функции фильтра;
- сегментация изображения (выделение фона от важных макроразмерных структур) для нахождения порогового значения (порога) для полного определения объекта;

– анализ выбранных объектов.

Программа ImageJ, применяемая для анализа изображений, использует метод обнаружения краев – это алгоритм, который используется для выделения границ объектов на изображении. Он основан на вычислении градиента изображения, который показывает изменение яркости в каждой точке изображения. Однако при преобразовании изображения в 8-битное (256 цветов) для повышения контрастности из исходного 24-битного (полноцветное изображение) не все цвета могут быть представлены в 256-цветном пространстве, что ограничивает получение точных данных о пористой структуре материала.

Цифровое изображение поверхности разреза пенобетона импортируется в специализированную программу, которая позволяет определить процентное содержание пикселей для каждого значению цвета RGB на изображении. Пиксели группируются в кластеры на основе их цветового сходства – пиксели с похожими цветами с большей вероятностью будут сгруппированы вместе. Здесь сходство цветов основано не только на оттенке – оно учитывает все аспекты цвета: яркость, цветность и оттенок.

Показатель поверхностной пористости пенобетона определяется процентным содержанием пикселей сформированного цифрового изображения, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, т.е. с интенсивностью каждого из трех цветовых компонентов: красного, зеленого и синего, от 0 до 200. К пикселям с RGB от 0 до 100 следует отнести пиксели пор, заполненных измельченным аморфным углеродом; от 100 до 200 – пиксели фактических границ пор, полученные при последовательном освещении поверхности пенобетона, как пористого тела, световыми лучами; от 200 до 255 – пиксели межпоровых перегородок.

Для сравнения полученных данных в исследовании использовались данные, полученные с использованием программы ImageJ, а также результаты натурных исследований пористости образцов пенобетонов.

Результаты анализа изображений представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты анализа цифровых изображений поверхности разреза образцов пенобетонов марок по средней плотности *D200-D300*

№ образца	Параметр кластера	Раздел кластера			Поверхностная пористость, %		
					полученная разработанным способом	полученная программой ImageJ	полученная натурными исследованиями
Марка по средней плотности <i>D200</i>							
1	Код RGB	229,229,229	115,115,115	13,13,13	88,88	87,93	89,12
	Содержание пикселей, %	11,12	35,15	55,73			
2	Код RGB	220,221,221	115,115,115	13,13,13	88,57	89,77	88,94
	Содержание пикселей, %	11,43	36,56	52,01			
3	Код RGB	232,232,232	115,115,115	13,13,13	86,59	84,18	86,01
	Содержание пикселей, %	13,41	32,01	54,58			
Марка по средней плотности <i>D250</i>							
1	Код RGB	229,229,229	115,115,115	13,13,13	84,35	83,87	84,83
	Содержание пикселей, %	11,12	35,15	55,73			
2	Код RGB	221,221,221	115,115,115	13,13,13	84,22	83,41	84,98
	Содержание пикселей, %	11,43	36,56	52,01			
3	Код RGB	232,232,232	115,115,115	8,8,8	83,75	82,90	84,25
	Содержание пикселей, %	13,41	32,01	54,58			
Марка по средней плотности <i>D300</i>							
1	Код RGB	253,253,254	192,192,192	1,2,3	81,34	80,78	81,45
	Содержание пикселей, %	18,66	30,54	50,80			
2	Код RGB	248,248,247	192,192,192	8,8,8	82,26	80,96	81,86
	Содержание пикселей, %	17,74	29,89	52,37			
3	Код RGB	248,248,247	186,186,186	8,8,8	80,10	78,88	80,53
	Содержание пикселей, %	19,90	33,24	46,86			

На основании результатов исследования, приведенных в таблице 4.13, можно сделать вывод о высокой сходимости значений пористости, полученных при помощи разработанного метода, результатов натуральных исследований и с использованием программы ImageJ, при этом относительное допускаемое расхождение между результатами не превышает 1%.

Необходимо отметить, что предложенный метод позволяет исключить недостатки существующих подходов, таких как недостаточная разница

градиентов пикселей при освещении световыми лучами под углом и ограничения, связанные с проникновением пигмента в мелкие поры при использовании пигментной смеси. Таким образом, использование предложенного авторами метода определения пористости ячеистого бетона позволяет получить качественные и достоверные данные о пористости пенобетона по цифровому изображению его поверхности разреза.

Метод анализа изображений поверхности разреза теплоизоляционного пенобетона успешно демонстрирует свою эффективность в получении подробных данных о структуре материала на макроуровне. Значения пористости, полученные с помощью разработанного метода, сопоставимы с результатами, полученными программой ImageJ, с относительным допуском не более 1%. Такая высокая степень сходимости подтверждает эффективность и точность разработанного метода в определении поверхностной пористости ячеистого бетона по цифровому изображению его поверхности разреза.

4.5. Исследование фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов

4.5.1. Фрактальная размерность дискретной топологии пористой структуры ячеистых бетонов

Фрактальная геометрия предоставляет инструментарий для описания сложных геометрических образов, таких как пористые материалы, путем использования фрактальных размерностей, которые отражают степень их нерегулярности [144, 145]. Расчет фрактальных размерностей имеет важное значение в применении концепций фракталов на практике.

Для двумерных объектов используется метод подсчета ячеек, где ячейки, содержащие объект, подсчитываются на разных масштабах для вычисления фрактальных размерностей (рисунок 4.20). Именно метод подсчета ячеек наиболее оптимален для определения фрактальной размерности плотности упаковки пор ячеистого бетона.

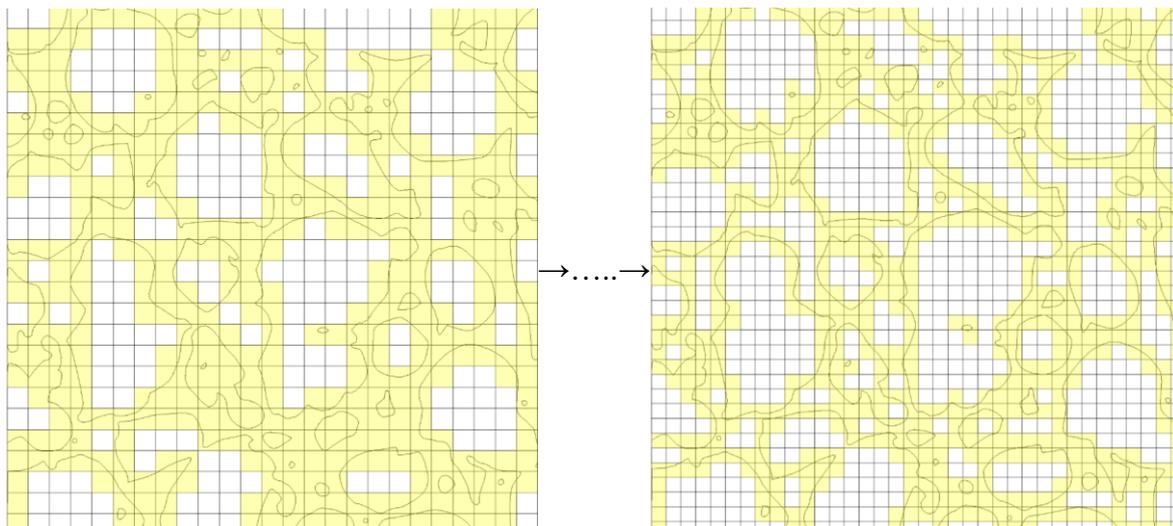


Рисунок 4.20 – Графики фрактального объекта по мере уменьшения размера клетки при определении фрактальной размерности методом подсчета ячеек

Метод мультифрактального анализа применяется для определения мультифрактальной размерности объектов, имеющих неравномерную структуру. Мультифрактальный анализ позволяет получить информацию о распределении размеров объектов внутри образца и может быть использован для характеристики многомасштабных структур.

При исследовании фрактальной размерности D поры ячеистого бетона методом подсчета клеток необходимо определить, какую площадь пора занимает на плоскости. Для этого расчерчивается плоскость на ячейки, размер которых обозначим как a . Затем определяется, какое количество ячеек N пересекает рисунок внутренней грани поры. Причем N и a связаны формулой Мандельброта-Ричардсона:

$$N = C \cdot a^{-D}, \quad (4.20)$$

где D – фрактальная размерность рассматриваемой поры, C – типовой во фрактальной геометрии неопределенный множитель.

Показатель D , как это следует из (1), удобно определить следующим образом:

$$D = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln N(a)}{\ln 1/a}. \quad (4.21)$$

Таким образом, число масштабов степенным образом зависит от масштаба измерения, а степенной показатель оказывается фрактальной размерностью

рассматриваемого объекта. При этом, чем меньше масштаб, тем больше требуется число масштабов (рисунок 4.21). Формы, сохраняющиеся при разном изменении масштаба по разным координатным осям, называются самоподобными. Однако поскольку форма поры при оптимальных условиях стремится к сферической, а при определении формы поры на плоскости – форме круга, относящейся к геометрической иерархической структуре, особенностью которой является отсутствие самоподобия как отдельной фигуры, фрактальная размерность круга $D = 1$. Таким образом, приведение наибольшего количества пор ячеистого бетона к $D = 1$ позволит оценить плотность упаковки сферических пор [147, 196].

При совершенствовании технологии ячеистого бетона определение фрактальной размерности формы пор позволит определить количество и характер пор, имеющих шарово-полиэдрическую форму или форму эллипсоида вращения. Фрактальную размерность таких пор целесообразно определять по формуле:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n \ln N \cdot \sum_{i=1}^n \ln a - n \sum_{i=1}^n \ln a \cdot \ln N}{n \sum_{i=1}^n \ln a^2 - (\sum_{i=1}^n \ln a)^2}, \quad (4.22)$$

где n – число измерений.

Для качественной оценки формы пор ячеистого бетона проведено исследование фрактальной размерности отдельных пор, представленных в виде сферической ячейки и эллипсоида вращения методом подсчета клеток. Результаты измерения представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Результаты измерений пор различной формы

Размер ячейки a , мм	Круг			Сферическая ячейка			Эллипсоид вращения		
	Количество ячеек N	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек N	$\ln a$	$\ln N$	Количество ячеек N	$\ln a$	$\ln N$
2,5	24	1,386	3,178	32	1,386	3,465	21	1,386	3,044
2,0	28	1,609	3,332	42	1,609	3,737	29	1,609	3,367
1,5	40	1,897	3,688	57	1,897	4,043	38	1,897	3,637
1,0	58	2,302	4,060	80	2,302	4,382	50	2,302	3,912
0,75	80	2,590	4,382	108	2,590	4,682	75	2,590	4,317
0,5	120	2,995	4,787	164	2,995	5,099	100	2,995	4,60

Подставляя значения, приведенные в таблице 4.14, в формулу (4.22) получим:

$$D_{\text{круг}} = 1,001;$$

$$D_{\text{сф.яч.}} = 0,9926;$$

$$D_{\text{элл.вр.}} = 0,9319.$$

По результатам исследования фрактальной размерности пор можно сделать вывод о том, что фрактальная размерность сферические поры, формируемой в ячеистом бетоне при оптимальных условиях, наиболее близка к фрактальной размерности круга. Поры формы эллипсоида вращения имеют меньшую фрактальную размерность. Оценка фрактальной размерности формы пор в контексте ячеистого бетона имеет важное значение для понимания и управления микроструктурой данного материала. Определение фрактальной размерности пор позволяет более глубоко понять, каким образом поры в ячеистом бетоне организованы на микроуровне. Фрактальная размерность говорит о степени самоподобия и масштабной инвариантности пор, т.е. о том, насколько поры похожи друг на друга на разных масштабах.

В процессе взаимодействия пор при формировании ячеистого бетона, при отсутствии полной коалесценции в материале, образуется определенная пористая макроструктура, которая включает в себя тесно расположенные сферические поры и называется упаковкой. Максимальные значения пористости достигаются в случае идеальной геометрически правильной укладки (упаковки) пор, такой как кубическая и гексагональная.

При исследовании процессов упаковки сферических пор, обладающих идентичным диаметром d , в условиях плотной упаковки (гексагональной или кубической конфигурации, рисунки 4.21 и 4.22) наблюдается инвариантность параметра пористости относительно абсолютных размеров частиц. Данный феномен обусловлен геометрическим подобием систем: при сохранении топологии контактного взаимодействия между порами (координационного числа) объемная доля пустотного пространства сохраняется как структурная константа, что подтверждается принципами теории плотных упаковок.

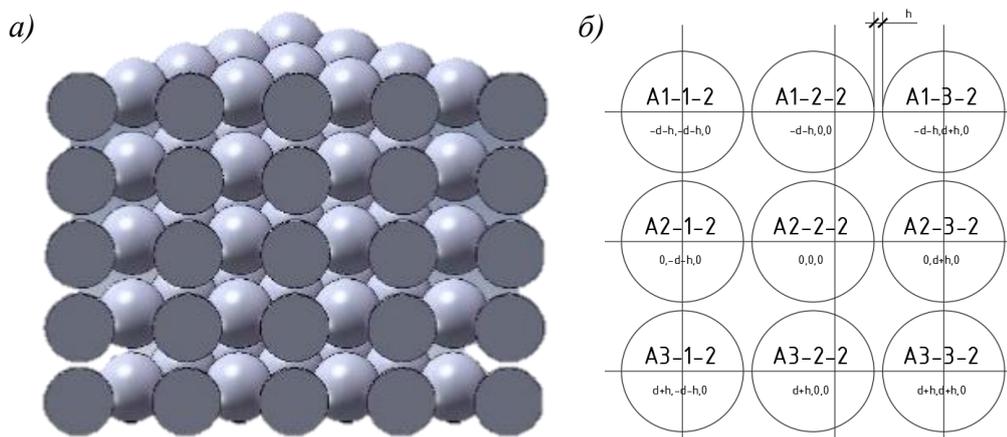


Рисунок 4.21 – Характер плотной кубической упаковки сферических пор одного диаметра:
a – общий вид; *б* – схема

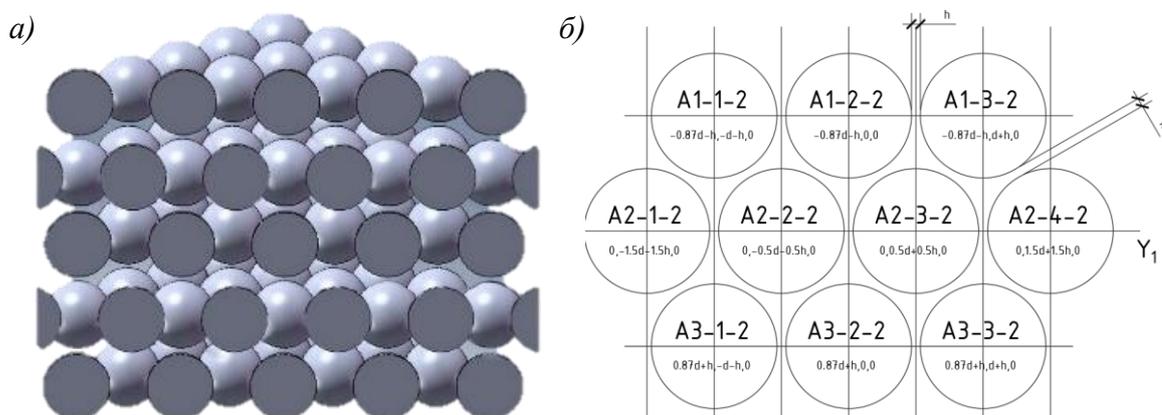


Рисунок 4.22 – Характер плотной гексагональной упаковки сферических пор одного диаметра:
a – общий вид; *б* – схема

В гетеродисперсных системах с бимодальным распределением пор по размерам (рисунок 4.23) меньшие поры (вторичная фракция) занимают интерстициальные зоны, формирующиеся между макроскопическими порами (первичная фракция). Такое пространственное распределение приводит к образованию композитной каркасной структуры с повышенной стабильностью, где малые поры играют роль заполнителя, минимизируя локальные напряжения в матрице.

Дальнейшая градация системы за счет введения третичной (рисунок 4.24) и четвертичной (рисунок 4.25) фракций пор инициирует иерархическую оптимизацию морфологии материала. Каждый последующий класс пор, характеризующийся уменьшающимся диаметром, последовательно заполняет остаточные мезо- и микропустоты, образованные более крупными фракциями. Этот каскадный механизм упаковки приводит к нелинейному снижению общей

пористости и перераспределению порового пространства в сторону фракталоподобной организации.

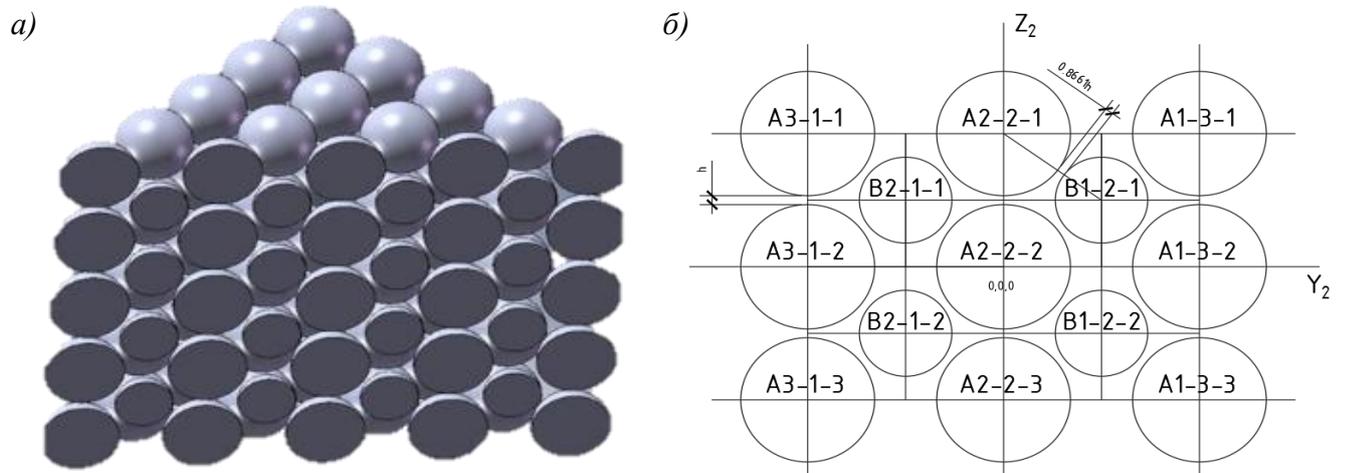


Рисунок 4.23 – Характер бинарной упаковки сферических пор с бимодальным распределением диаметров: *a* – общий вид; *б* – схема

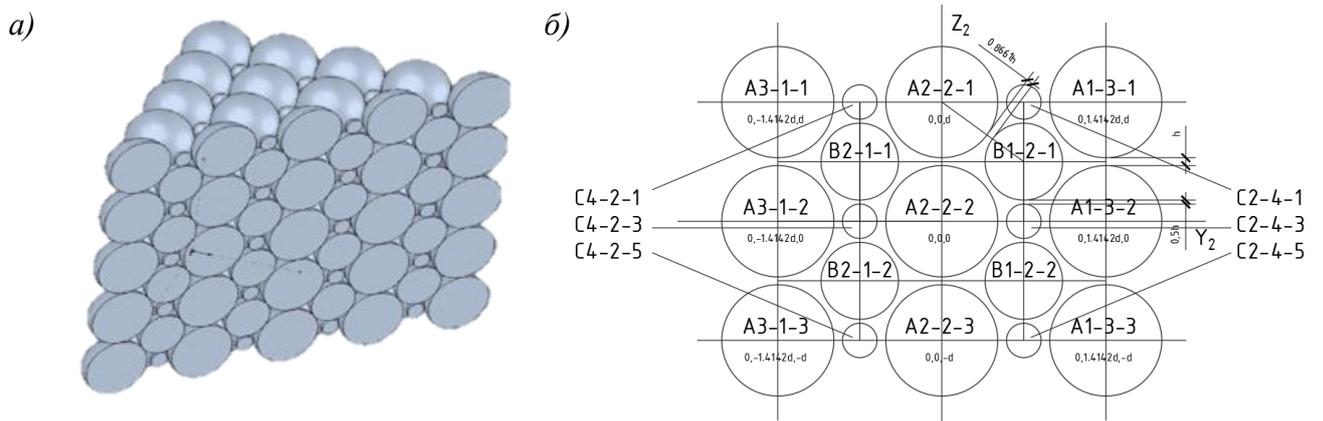


Рисунок 4.24 – Характер тернарной иерархической упаковки сферических пор трех различных диаметров: *a* – общий вид; *б* – схема

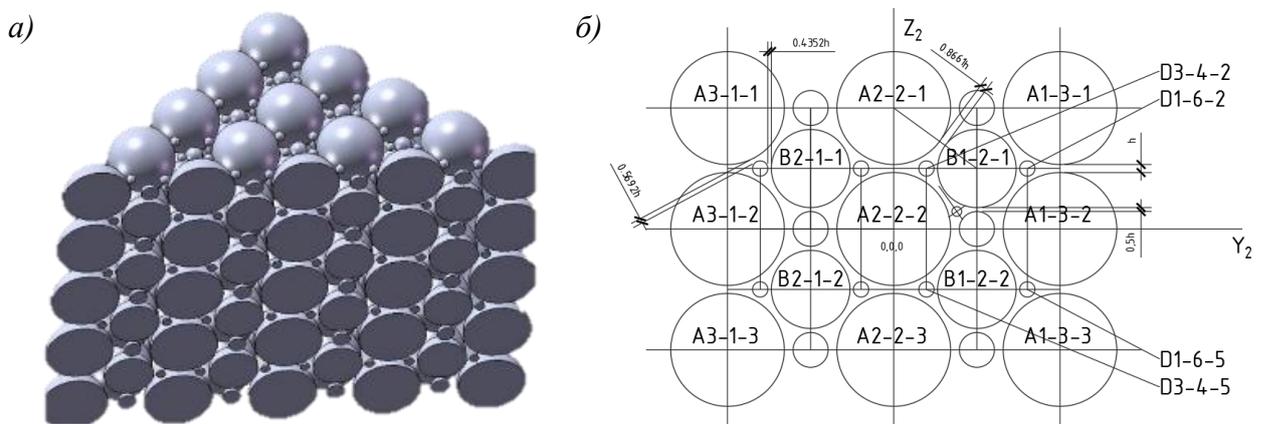


Рисунок 4.25 – Характер кватернарной иерархической упаковки сферических пор четырех различных диаметров: *a* – общий вид; *б* – схема

Для количественного описания характера упаковки пор необходимо ввести безразмерный количественный показатель фрактальности. Предложено в

качестве такого показателя использовать фрактальную размерность D , которая будет характеризовать степень заполнения порами объема ячеистого бетона и принимать значения от 1 до 2. Значение $D = 1$ означает, что пор совсем нет. Величина $D = 2$ отвечает тому, что вся площадь рассматриваемого участка структуры ячеистого бетона полностью заполнена порами, т. е. участок представляет собой одну сплошную пору.

Измерение фрактальной размерности характера упаковки пор произведем следующим способом. Суммарный линейный размер R нескольких пор (например, сумма их поперечных размеров) связан с масштабом измерения a формулой Мандельброта – Ричардсона: $R \sim a^{1-D}$. С другой стороны, если S – суммарная площадь рассматриваемых, то $R \sim S^{0.5}$. Если поры покрыть сеткой, то их площадь будет пропорциональна числу K узлов сетки, попавших внутрь границ пор. Поэтому устанавливаем связь между числом узлов K сетки и размером ячейки a :

$$K \sim a^{-2(D-1)} \quad (4.23)$$

В качестве размера ячеек плоскости при расчете приняты значения 1/14; 1/18; 1/20; 1/25; 1/32, 1/48 и 1/92 от условной единичной длины, выбранной по количеству пикселей высоты изображения при разделении плоскости изображения на ячейки.

Сначала подсчитываются узловые точки сетки, находящиеся внутри контуров (M_0). Затем определяется количество узлов, попавших на линию контуров (M). Тогда число K будет равно следующему выражению (4.20):

$$K = M_0 + M/2 - 1. \quad (4.24)$$

Для выявления дисперсии среднего значения фрактальной размерности используем следующую методику. По семи измеренным точкам находим значения показателя $h = 2(D-1)$, вычисленных по формуле (4.21):

$$h = (\ln(K_{n+1}) - \ln(K_n)) / (\ln(a_{n+1}) - \ln(a_n)). \quad (4.25)$$

Отсюда следует, что фрактальная размерность упаковки пор:

$$D_a = 1,74 \pm 0,01;$$

$$D_b = 1,82 \pm 0,01;$$

$$D_c = 1,88 \pm 0,01;$$

$$D_2 = 1,95 \pm 0,01;$$

$$D_d = 1,98 \pm 0,01,$$

где D_a – фрактальная размерность кубической упаковки пор одного диаметра; D_b – фрактальная размерность гексагональной упаковки пор одного диаметра; D_c – фрактальная размерность бинарной упаковки сферических пор с бимодальным распределением диаметров; D_2 – фрактальная размерность тернарной иерархической упаковки сферических пор трех различных диаметров; D_d – фрактальная размерность кватернарной иерархической упаковки сферических пор четырех различных диаметров.

Исследование фрактальных свойств систем с порами различной дисперсности выявило зависимость размерности от степени структурной сложности. В случае моноупаковок сферических пор, организованных в регулярные решетки (например, кубическую или гексагональную), фрактальная размерность остается существенно ниже топологического предела двумерного пространства. Это связано с формированием ветвящихся кластеров пустот, чья масштабно-инвариантная организация напоминает диффузионно-ограниченные агрегаты. Гексагональная упаковка демонстрирует менее выраженную лакуарность по сравнению с кубической, что отражается в умеренном росте фрактальной размерности, однако оба случая сохраняют признаки разреженных фрактальных сетей.

Введение полидисперсности приводит к качественному изменению структурной организации. Добавление пор меньшего диаметра, заполняющих макропустоты между крупными фракциями, формирует двухуровневую иерархию, приближающую систему к компактным конфигурациям. Фрактальная размерность при этом возрастает, демонстрируя снижение лакуарности, но сохраняет промежуточные значения, характерные для канторовых множеств с

частичным заполнением. Последовательное включение третичного и четвертичного уровней пор усиливает иерархичность, минимизируя остаточные пустоты. Многоуровневая упаковка порождает структуры, близкие к губчатым фракталам, где самоподобие проявляется в перераспределении пустотного пространства между масштабами.

Прогрессирующее увеличение фрактальной размерности в полидисперсных системах коррелирует с уменьшением доли незаполненных областей, однако даже максимально градированные упаковки не достигают евклидовой размерности. Это указывает на устойчивость иерархических паттернов, обеспечивающих баланс между плотностью упаковки и фрактальными свойствами. Сравнение с эталонными моделями (например, ковром Серпинского) подчеркивает роль дополнительного заполнения межуровневых зон в модификации размерности [197-199]

Критический анализ методологии выявил ограничения, связанные с проекцией трехмерных структур на двумерные срезы. Артефакты, такие как занижение размерности из-за потери информации о пространственной корреляции пор, требуют верификации методами 3D-томографии. Тем не менее, наблюдаемая тенденция роста фрактальной размерности с увеличением числа фракций подтверждает гипотезу о том, что иерархическая организация служит эффективным инструментом управления структурной сложностью пористых материалов.

Таким образом, переход от моно- к полидисперсным системам позволяет регулировать фрактальные характеристики, оптимизируя функциональные свойства материалов – от механической прочности, связанной с заполнением пустот, до транспортных характеристик, определяемых лакунарностью.

4.5.2. Фрактальная размерность кубической структуры ячеистых бетонов

Традиционные модели евклидовой геометрии в основном анализируют взаимосвязь между характеристиками пористых сред и соответствующими параметрами, такими как пористость и насыщенность, через определение

различных структурных единиц. Эти модели включают в себя две основные формы структуры: куб и цилиндр [200-202].

Подход к моделированию, представленный в виде кубической структуры элемента, включает модель кубической характеристической структуры, учитывающую взаимодействие между твердыми частицами. Эта модель описывает три типа контактов между твердыми частицами внутри куба: без контакта, точечный контакт и линейный контакт. Дополнительно, учитывая неидеальную форму твердых частиц в пористых средах, существуют модели цилиндрической структуры для прогнозирования эксплуатационных характеристик пористых материалов. Модели цилиндрической и кубической структур начинают с определения микроскопических характеристических структур и используют концепцию гомогенизации для описания поведения системы в макроскопическом масштабе. Таким образом, для достижения точности прогнозирования необходимо учитывать корректировку периодического расположения агрегатов в пространстве.

Микроструктура, размер пор и распределение пор внутри пористых сред имеют фрактальные характеристики. Следовательно, эксплуатационные характеристики материала можно предсказать, установив функциональную связь между данными показателями и такими параметрами, как пористость и фрактальная размерность, исходя из свойств каждого компонента твердой фазы и его распределения внутри пористого материала.

Фрактальная теория имеет преимущества в более точном прогнозировании и более обоснованном описании внутренней структуры пор для прогнозирования эффективности пористых материалов. Одновременно решается задача точного прогнозирования эффективности пористых строительных материалов, состоящих из твердой фазы, представленной частицами в диапазоне полной пористости.

Фрактальная размерность может быть представлена как фрактальное измерение длины, площади или объема. Она отличается от евклидовой геометрии тем, что размерность часто представляет собой не целое число, а дробь, обычно находящуюся между размерностями точки, линии и поверхности. Например, для

двумерного пространства фрактальная размерность находится между 1 и 2, а для трехмерного пространства – между 2 и 3 [203].

Одним из ключевых свойств фракталов является их масштабная инвариантность, что означает сохранение формы, сложности и нерегулярности независимо от изменения масштаба (самоподобие). Пористые строительные материалы, такие как ячеистый бетон, обладают сложным распределением пор по размерам, включая микро-, мезо- и макропоры. Разница между минимальным и максимальным размерами пор значительно превышает два порядка. В связи с этим фрактальная теория может быть использована для описания характеристик внутренней структуры таких материалов.

Для анализа пористой структуры пористых строительных материалов особое внимание уделяется фрактальной размерности и пористости губки Менгера. Графическим основанием для изучения губок Менгера служит ковер Серпинского – типичная самоподобная фрактальная фигура (рисунок 4.26). Процесс построения ковра начинается с квадрата со стороной A , из центра которого вырезается меньший квадрат со стороной B . Получившуюся область разделяют на малые квадраты со стороной 1, повторяя операцию вырезания для каждого квадрата. Этот процесс продолжается до бесконечности, создавая ковер Серпинского, который состоит из $(A^2 - B^2)$ одинаковых частей, масштабирование каждой из которых в B раз позволяет получить полный ковер.

Губка Менгера является трехмерным аналогом ковра Серпинского, и ее форма создается аналогичными операциями, проводимыми над кубом [199]. Процесс ее формирования показан на рисунке 4.27.

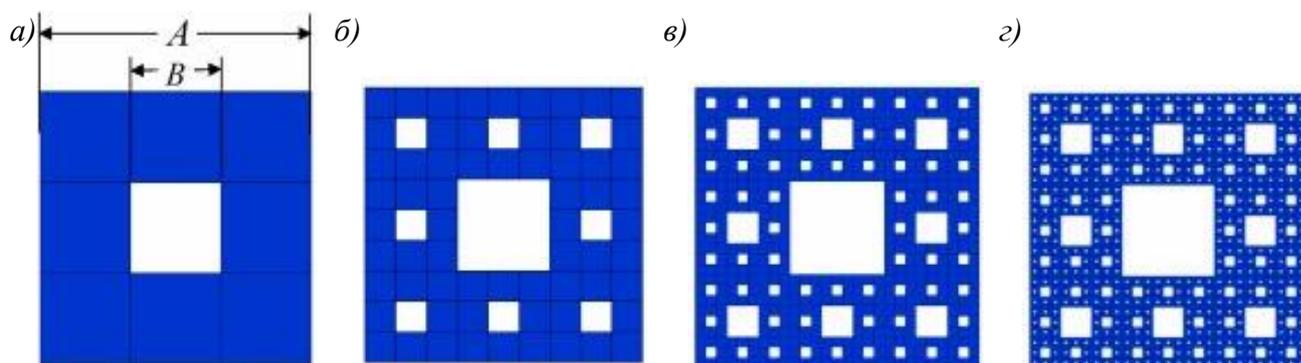


Рисунок 4.26 – Генерация ковров Серпинского: a – форма ковра Серпинского первого порядка; b – то же, второго порядка; c – то же, третьего порядка; d – то же, четвертого порядка

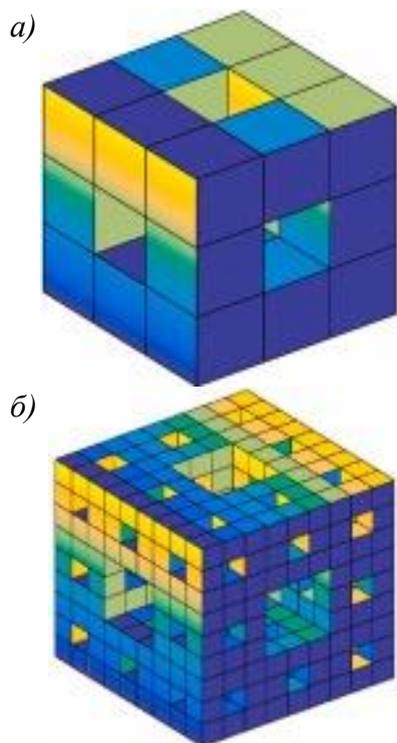


Рисунок 4.27 – Образование губки Менгера: *a* – форма губки Менгера первого порядка; *б* – то же, второго порядка

Сначала для куба с длиной стороны A каждая сторона разделяется на A равных частей, образуя A^3 маленьких кубиков со стороной длиной 1. Затем удаляются B^3 маленьких кубиков в центре исходного куба и в центре каждой его грани. После этого количество оставшихся маленьких кубиков составляет $(A^3 - 7B^3)$. Таким образом, имеется $(A^3 - 7B^3)$ одинаковых частей, каждую из которых можно увеличить в A раз, чтобы получить полную исходную структуру.

Пористые строительные материалы состоят из твердых частиц и пор. Внутри пор могут находиться газ или жидкость. Структурные особенности пор в пористых строительных материалах можно представить, как взаимосвязанные поры различного размера. Эти поры могут быть смоделированы через

итерацию губок Менгера [204, 205]. Менгер первого порядка используется для создания кубической характеристической единицы в физической модели эксплуатационных характеристик пористых строительных материалов, где твердые частицы составляют твердую фазу. На рисунке 4.28, *a* черная область отображает твердую фазу, а белая область представляет пористую фазу. При условии, что длина стороны кубической характеристической единицы A равна 3, а длина стороны внутреннего малого куба B равна 1, на рисунке 4.28, *б* показаны три формы поперечного сечения структуры кубической характеристической единицы в направлении теплового потока.

Учитывая, что распределение твердых частиц внутри пористого строительного материала является хаотичным и неупорядоченным, существует как контактирующие, так и не контактирующие друг с другом твердые частицы. Контактующие частицы обладают контактным термическим сопротивлением. Поскольку реальные твердые частицы имеют трехмерную форму, контактирующие частицы сжимаются и контактируют с окружающими частицами в нескольких

направлениях, что приводит к появлению контактного термического сопротивления в нескольких направлениях.

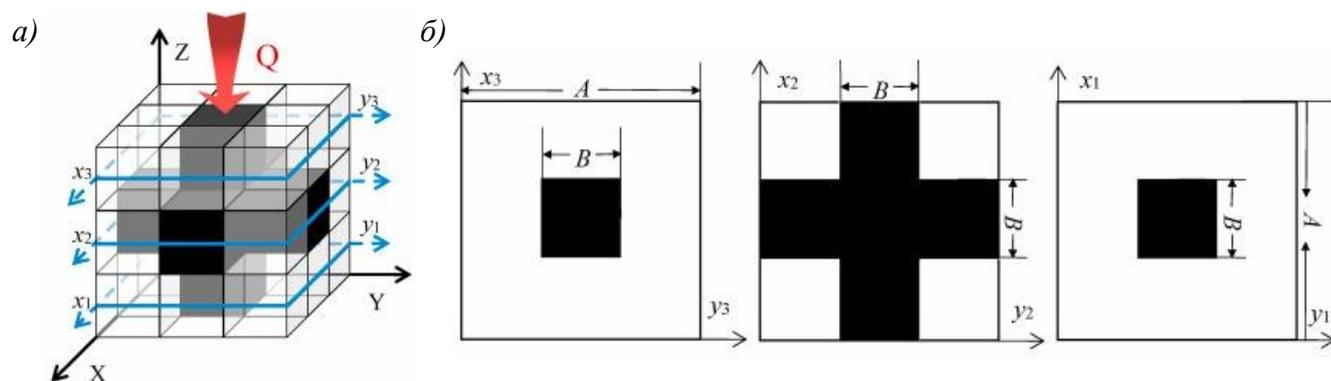


Рисунок 4.28 – Кубическая характеристическая структура единицы на основе губки Менгера первого порядка: *a* – форма губки Менгера; *б* – формы поперечного сечения

Предполагается, что маленькие кубики в центре кубической характеристической единицы представляют собой частицы твердой фазы, а маленькие черные кубики в центре каждой грани обозначают контактное термическое сопротивление. Рисунок 4.28 можно рассматривать как физическую модель эксплуатационных характеристик пористых строительных материалов, где контакт между твердыми частицами предполагается полным и сопротивление наибольшим. Однако на практике ситуация чаще всего отличается. При этом учитывается, что в реальности твердые частицы имеют неравномерную структуру, и контакт между ними редко бывает полным.

В реальных условиях эксплуатации пористость пористых строительных материалов изменяется в широком диапазоне, обычно в пределах от 0 до 0,95. При неизменных длинах сторон A и B диапазон пористости может быть регулируем только путем изменения значения n в итерационной модели. Это ограничивает способность модели прогнозировать эксплуатационные характеристики только в определенном диапазоне пористости. Поскольку модель имитирует материалы с разной пористостью через итерации, то пористость моделируемых материалов также остается постоянной при фиксированных A и B . В настоящее время модель способна предсказать эксплуатационные характеристики только в ограниченном числе дискретных точек пористости, что затрудняет получение прогнозируемых значений

эксплуатационных характеристик при других уровнях пористости в пределах диапазона модели, что сильно ограничивает ее применимость.

Структура губки Менгера, обладающая самоподобием, может более точно отражать реальные пористые структуры внутри строительных материалов. В настоящее время модели прогнозирования, основанные на теории фракталов, часто используют ковер Серпинского. Однако ковер Серпинского начинается с двумерного графа, что делает недостаточным учет контактов между твердыми частицами внутри материала. Такое моделирование контактов между частицами не всегда точно описывает реальные структуры пор и взаимодействия между частицами внутри пористого материала.

Учитывая особенности многоуровневого распределения пор в пористых строительных материалах, рекомендуется разработать физическую модель эксплуатационных характеристик двухфазных пористых строительных материалов, основанной на улучшенной фрактальной структуре губки Менгера для прогнозирования их эксплуатационных характеристик.

4.5.3. Фрактальная размерность пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Пенобетоны, обладающие высокой пористостью, широко применяются в строительстве благодаря сочетанию низкой теплопроводности, малой плотности и достаточной механической прочности. Ключевым фактором, определяющим их эксплуатационные характеристики, является структура порового пространства, которая характеризуется не только объемной долей пустот, но и их морфологией, распределением по размерам, а также геометрической сложностью. Традиционные параметры, такие как общая пористость, средний диаметр пор или коэффициент формы, не всегда полно отражают иерархическую организацию пор, что ограничивает возможность прогнозирования свойств материала.

Фрактальная размерность, как количественная мера пространственной сложности, позволяет описать масштабно-инвариантные свойства пористой структуры, выявив взаимосвязь между микроскопической морфологией и макроскопическим поведением материала. В отличие от статических параметров

(например, пористости), фрактальная размерность интегрирует информацию о распределении пор по размерам, их форме и взаимном расположении, что делает ее перспективным инструментом для анализа структурной неоднородности.

Анализ направлен на выявление корреляций между фрактальной размерностью и перечисленными показателями. Установлено, что рост общей пористости, как правило, сопровождается увеличением лакунарности структуры, что снижает фрактальную размерность. Однако при наличии полидисперсного распределения пор (сочетание макро-, мезо- и микропустот) фрактальная размерность демонстрирует нелинейную зависимость от пористости, отражая формирование иерархически упорядоченных кластеров.

Коэффициент формы пор, в свою очередь, оказывает значительное влияние на фрактальные свойства: материалы с сильно вытянутыми или ветвящимися порами характеризуются повышенной размерностью из-за усложнения поверхности раздела. Это подтверждается данными по площади поверхности пор, где высокая шероховатость и извилистость границ коррелируют с ростом фрактальной размерности даже при фиксированной пористости.

Для проведения исследования использовались наборы фрагментов поверхности пенобетона марки по средней плотности $D200$ и $D300$ размером 15×15 мм каждый, описанные в п. 4.4.2. Параметры пористости определены с использованием авторской программы определения параметров пористости ячеистых бетонов (приложение В).

Результаты анализа изображений представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Результаты анализа изображений поверхности образцов теплоизоляционных пенобетонов

№ п/п	Марка по средней плотности	Пористость, %	Средний диаметр пор, мм	Площадь поверхности пор, мм ²	Коэффициент формы пор
1	$D200$	88,88	0,67	1,85	1624
2	$D200$	88,57	0,68	1,84	1666
3	$D200$	86,59	0,72	1,80	1552
4	$D250$	84,35	0,96	1,66	1478
5	$D250$	84,22	0,97	1,64	1468
6	$D250$	83,75	1,04	1,60	1413
7	$D300$	81,34	1,23	1,45	1180
8	$D300$	82,26	1,18	1,52	1257
9	$D300$	80,10	1,25	1,46	1101

Для расчета фрактальной размерности в пенобетонах используются размеры ячеек плоскости на уровнях 2,5, 2,0, 1,0, 0,5 и 0,1 мм. Для изучения разброса среднего значения фрактальной размерности применяется выборка из пяти измеренных точек вычисляются десять значений показателя $h = 2(D-1)$, где D – фрактальная размерность, вычисленная по формуле (4.25).

Результаты расчета фрактальной размерности представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Результаты расчета фрактальной размерности

Показатель	Размер ячейки a , мм				
	2,5	2,0	1,0	0,5	0,1
Номер образца	1				
Количество ячеек N	45	80	220	600	4500
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	3,81	4,38	5,39	6,40	8,41
Номер образца	2				
Количество ячеек N	52	90	250	700	5000
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	3,95	4,50	5,52	6,55	8,52
Номер образца	3				
Количество ячеек N	48	85	270	650	4800
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	3,87	4,44	5,60	6,48	8,47
Номер образца	4				
Количество ячеек N	60	100	270	750	5200
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,09	4,60	5,60	6,62	8,56
Номер образца	5				
Количество ячеек N	55	95	260	720	5100
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,01	4,55	5,56	6,58	6,60
Номер образца	6				
Количество ячеек N	58	98	265	735	5150
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,06	4,58	5,58	6,54	8,55
Номер образца	7				
Количество ячеек N	70	120	350	950	6500
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,25	4,79	5,86	6,86	8,78
Номер образца	8				
Количество ячеек N	65	110	320	900	6200
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,17	4,70	5,77	6,80	8,73
Номер образца	9				
Количество ячеек N	75	130	380	1050	7000
$\ln a$	0,916	0,693	0	-0,693	-2,302
$\ln N$	4,32	4,87	5,94	6,96	8,85

На основании полученных данных построены графики зависимости фрактальной размерности от основных характеристик пористой структуры пенобетонов, представленные на рисунке 4.29.

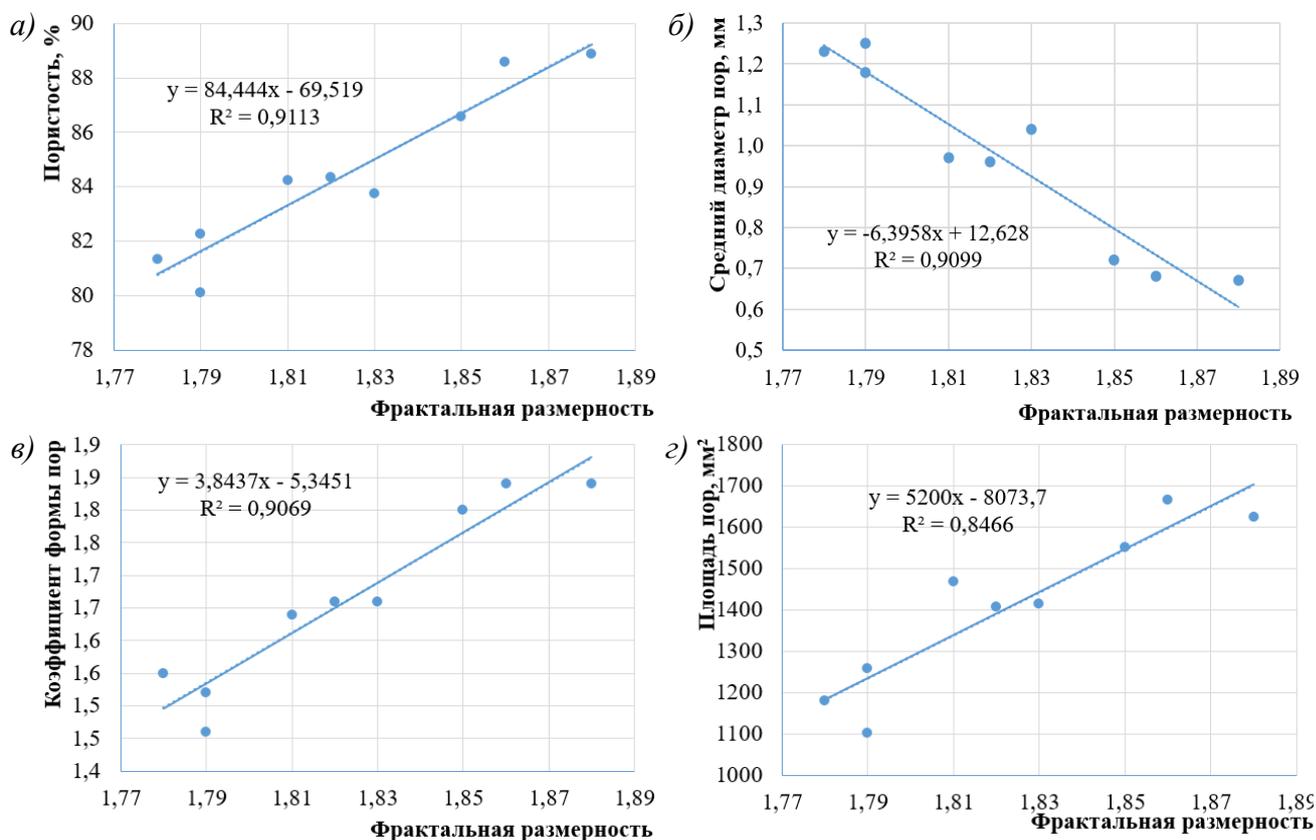


Рисунок 4.29 – Зависимости фрактальной размерности от основных характеристик пористой структуры пенобетонов: *а* – от пористости; *б* – от среднего диаметра пор; *в* – от коэффициента формы пор; *з* – от площади пор

Из данных, представленных на рисунке 4.29, *а*, видно, что фрактальная размерность пор повышается пропорционально увеличению пористости. Присутствует значительная связь между пористостью и фрактальной размерностью пор. Коэффициент регрессии $R^2 = 0,9113$ указывает на сильную зависимость между фрактальной размерностью пор и уровнем пористости: чем выше фрактальная размерность, тем выше пористость. Это означает, что пористость, т.е. объем пор в материале, возрастает параллельно увеличению сложности структуры пор. Фрактальная размерность в данном случае является мерой этой сложности изображений структуры пор. Изменения в фрактальной размерности указывают на увеличение пространственной заполненности структуры материала порами при росте пористости. Это означает, что с

увеличением пористости структура материала становится более сложной и заполненной порами, что подтверждается анализом фрактальной размерности пористой структуры.

Коэффициент регрессии R^2 между фрактальной размерностью и средним диаметром составляет 0,9176 (рисунок 4.29, б), что указывает на наличие определенной корреляции между фрактальной размерностью и средним размером пор в материале.

Согласно теории фракталов, чем больше фрактальная размерность пор, тем меньше средний размер пор и тем сложнее пространственное распределение пор в материале. Это означает, что при увеличении фрактальной размерности пор повышается количество мелких пор. При одинаковой пористости пенобетона, увеличение среднего диаметра пор и среднего размера пор приводит к уменьшению количества отверстий и увеличению толщины стенок пор соответствующей поровой структуры. Это происходит из-за того, что при больших размерах пор среднее количество отверстий уменьшается, и поры имеют более толстые стенки.

Такие результаты показывают, что фрактальная размерность пор может быть полезным инструментом для описания распределения пор по размерам и структуры порового пространства материала. Кроме того, она предоставляет возможность для дальнейшего изучения взаимосвязи между фрактальной размерностью и капиллярным давлением воды, что имеет значение для понимания физико-механических свойств материала.

Фактор формы является ключевым показателем, определяющим форму поровой структуры и близость ее к круглой форме. Коэффициент формы отражает, насколько форма поровой структуры отличается от сферической. Из рисунка 4.29, в видно, что коэффициент регрессии R^2 между фрактальной размерностью и коэффициентом формы достигает 0,9069. По мере увеличения фрактальной размерности пористой структуры увеличивается и коэффициент формы пористой структуры. Это указывает на то, что форма поровой структуры больше отклоняется от круглой, что аналогично зависимости фрактальной

размерности пор от пористости, приведенной на рисунке 4.29, *a*. Поэтому фрактальная размерность пор может быть использована для характеристики степени отклонения структуры пор от круглой формы.

Из рисунка 4.29, *z* видно, что коэффициент регрессии R^2 между фрактальной размерностью пор и площадью поверхности пор составляет 0,8466. Это значение указывает на наличие хорошей корреляции между фрактальной размерностью пор и площадью поверхности пор. При одинаковой пористости материала, меньшая площадь поверхности пор свидетельствует о наличии меньшего количества пор малого диаметра и о более гладкой поверхности пор. Это связано с тем, что при одинаковой пористости, если поры имеют меньшую площадь поверхности, они склонны иметь больший диаметр, что делает их менее шероховатыми.

Оценка фрактальной размерности пор позволяет не только оценить шероховатость поверхности пор, но и оценить распределение пор по размерам на поверхности пор. Фрактальная размерность служит индикатором структурной сложности пористой поверхности, отражая ее геометрические характеристики и связь между размерами пор и их геометрическими параметрами.

Путем анализа фрактальных параметров пор, таких как размеры, формы и распределение пор, можно определить оптимальную конфигурацию пор, способствующую улучшению характеристик материала. Например, более регулярная или определенная геометрическая организация пор может способствовать улучшению теплоизоляционных свойств, прочности и звукоизоляции пенобетона. Такое улучшение свойств может быть достигнуто за счет более точного контроля над структурой пор, обеспечивая оптимальные условия для улучшения функциональных характеристик материала.

Увеличение фрактальной размерности пор говорит о более сложной структуре порового пространства. Фрактальная размерность может описать распределение пор по размерам и структуру порового пространства, что открывает возможности для изучения связи с физико-механическими свойствами материала.

4.6. Выводы

1. Установлены закономерности влияния рецептурных факторов, а именно водотвердого отношения, расхода минеральных (перлит и микрокремнезем) и пенообразующих (пенообразователь ПО-6НП и бентонитовая глина в качестве стабилизатора пены) добавок, а также удельной поверхности сырьевых компонентов на среднюю плотность и прочность на сжатие пенобетона, позволяет управлять процессом получения теплоизоляционного материала.

2. Обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения 10 % микрокремнезема и 5 % вспученного перлитового песка в качестве минеральной добавки для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D300$; 5 % микрокремнезема и 10 % вспученного перлитового песка в качестве минеральных добавок для теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности $D200$ и $D250$, рекомендуемых для утепления стен с несущим каркасом, чердачных перекрытий, полов по лагам, плоских кровель и мансард.

3. Изучены изменения физических и эксплуатационных характеристик теплоизоляционного пенобетона в зависимости от процентного содержания сырьевых компонентов и условий их механоактивации.

4. По результатам исследований разработаны составы теплоизоляционных пенобетонов на базе сухих смесей и изучены изменения физико-механических характеристик в зависимости от процентного содержания сырьевых компонентов и условий их механоактивации, что обеспечивает низкую среднюю плотность ($202\text{--}296 \text{ кг/м}^3$) и теплопроводность ($0,06\text{--}0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) материала при достаточной прочности на сжатие ($0,5\text{--}1,1 \text{ МПа}$).

5. Микроструктурный анализ выявил ключевые закономерности формирования пористой архитектуры пенобетона: введение микрокремнезема при низком В/Т уплотняет межпоровые перегородки за счет нанозаполнения ($1\text{--}5 \text{ мкм}$), повышая прочность, тогда как перлит создает иерархическую структуру с мезопорами ($20\text{--}300 \text{ мкм}$), снижая плотность. Комбинация добавок минимизирует дефекты (трещины, сквозные поры) и трансформирует морфологию гидратных

фаз. Оптимизация состава позволяет проектировать материалы с заданным балансом прочности и теплоизоляции, управляя размером пор, плотностью перегородок и фазовым составом матрицы.

6. Проведенные исследования позволили разработать инновационный метод анализа изображений пористой структуры пенобетонов с использованием аморфного углерода, который продемонстрировал точность $\pm 1\%$ при определении пористости. Технология исключает погрешности, связанные с поверхностным натяжением водных пигментов, и обеспечивает достоверное заполнение даже субмиллиметровых пор, что подтверждено сравнением с данными программы ImageJ. Метод оптимизирует процедуру подготовки образцов, исключая этапы сушки и повторной шлифовки, что делает его перспективным для промышленного контроля качества.

7. Анализ фрактальной размерности (D) выявил прямую зависимость между структурной сложностью пор и функциональными свойствами материала. Для моноупаковок сферических пор (кубическая и гексагональная решетки) фрактальная размерность составила $D = 1,74-1,82$, тогда как полидисперсные системы с иерархической упаковкой (бинарные, тернарные фракции) показали рост D до 1,88-1,98. Увеличение фрактальной размерности коррелирует со снижением лакуарности и формированием устойчивых кластеров, что объясняет улучшение механической прочности при сохранении низкой теплопроводности.

8. Фрактальная размерность пористой структуры пенобетонов коррелирует с их пористостью и размерами пор. Увеличение фрактальной размерности связано с увеличением количества мелких пор и усложнением пространственного распределения пор. При одинаковой пористости, увеличение размеров пор приводит к уменьшению количества пор и толщине стенок пор. Корреляция фрактальной размерности пор с площадью и размером пор позволяет оценить шероховатость и распределение пор по размерам. Большая фрактальная размерность связана с меньшей площадью поверхности пор, что указывает на меньшую шероховатость пор и их более крупные размеры.

5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЕНОБЕТОНОВ НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ И ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Сухие пенобетонные смеси представляют собой перспективный материал для современного строительства, сочетающий высокие теплоизоляционные свойства, легкость обработки и экологичность. Их производство требует применения специализированных технологий, обеспечивающих точность дозирования компонентов, однородность структуры и стабильность характеристик готовой продукции [206-208].

Ключевым этапом технологии является совместный помол компонентов в роторно-шаровой мельнице, который повышает реакционную способность сырья и улучшает дисперсность смеси. Современные методы смешивания с использованием вибрационных устройств позволяют сократить время цикла и снизить энергоемкость процессов. Автоматизация упаковки, включая роботизированные манипуляторы и термоусадочные колпаки, минимизирует ручной труд и повышает производительность.

5.1. Совершенствование технологической схемы производства сухих смесей и теплоизоляционных пенобетонов на их основе

Производство сухих пенобетонных смесей представляет собой сложный технологический процесс, включающий несколько этапов, каждый из которых направлен на обеспечение высокого качества готовой продукции. Основными компонентами смеси являются цемент, перлит, микрокремнезем и бентонитовая глина. В процессе производства также используются пенообразователь и пластифицирующая добавка, которые улучшают свойства смеси.

Организация технологического процесса производства сухих пенобетонных смесей с применением сырьевых материалов и автоматизированных систем управления может быть реализована согласно предлагаемой технологической схеме, представленной на рисунке 5.1.

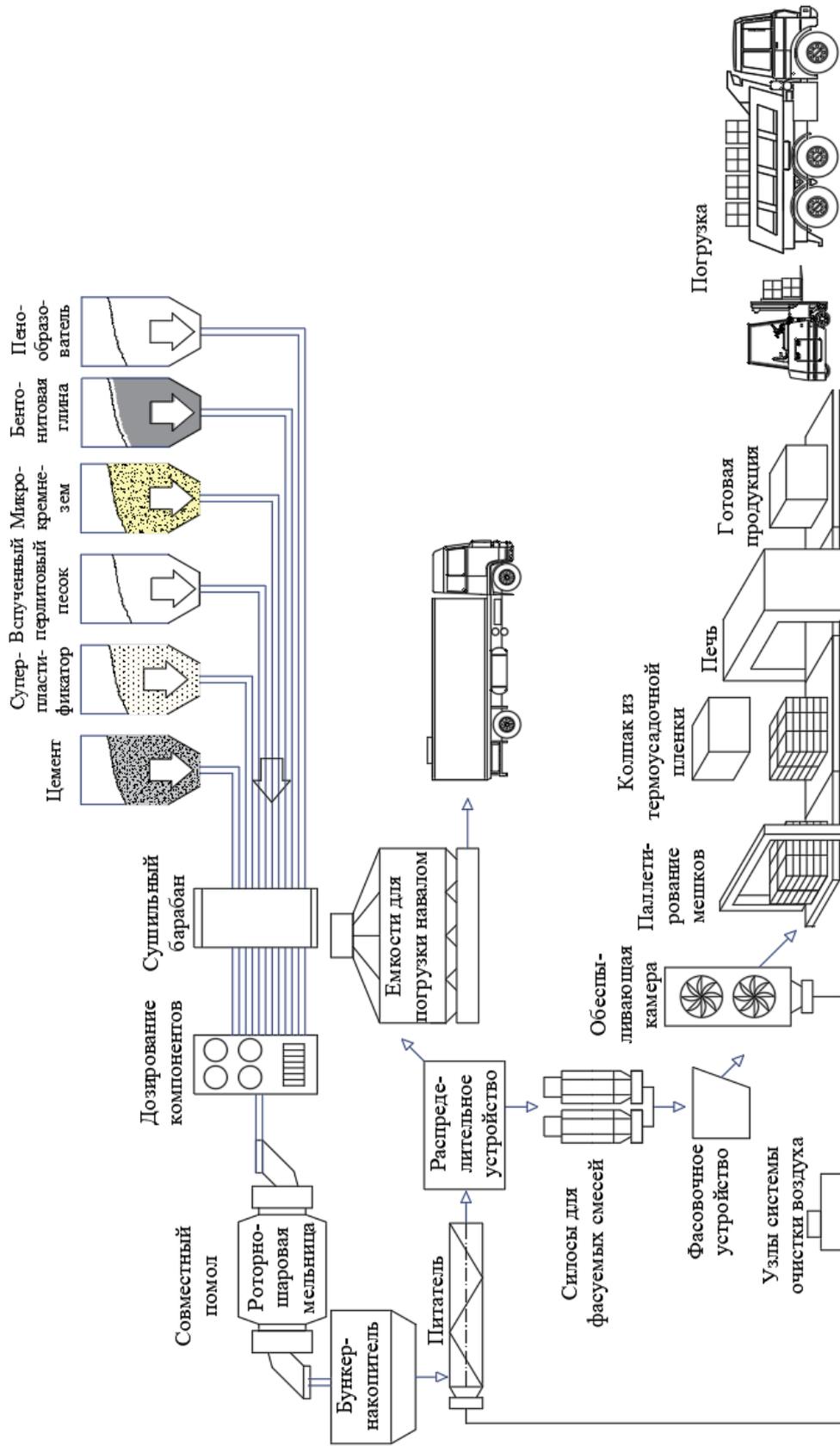


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства сухих пенобетонных смесей

Подготовка исходных материалов. На первом этапе осуществляется подготовка сырья. Сырьевые материалы, применяемые для изготовления сухих ячеистобетонных смесей, должны соответствовать требованиям российских стандартов для ячеистых бетонов, а также соответствовать действующему стандарту на материал. Пригодность сырьевых материалов для данных условий производства определяется на основе технологических испытаний. Объем испытаний уточняется в каждом конкретном случае.

Использование материалов, имеющих свойства, близкие к величинам, указанным в нормативных документах, позволяет прогнозировано получить ячеистый бетон с заданными, достаточно высокими, физико-техническими характеристиками. Контроль свойств исходных материалов является строго необходимым.

Компоненты смеси взвешиваются с использованием высокоточных весов, которые обеспечивают строгое соблюдение заданного рецепта. Точность дозирования играет ключевую роль в обеспечении стабильности характеристик готовой продукции. После взвешивания компоненты направляются на помол в роторно-шаровую мельницу. Совместный помол позволяет достичь высокой степени дисперсности сырья, что способствует лучшему взаимодействию компонентов в процессе дальнейшего смешивания. Мельница обеспечивает равномерное измельчение материалов до требуемой фракции, что улучшает их реакционную способность и повышает однородность будущей смеси.

Смешивание компонентов. После завершения помола измельченные компоненты поступают в смеситель, где происходит их объединение с пенообразователем и пластифицирующей добавкой. Процесс смешивания выполняется до достижения однородной массы, что крайне важно для обеспечения равномерного распределения всех ингредиентов в готовой смеси. Для повышения эффективности процесса используются вибрационные устройства, которые способствуют равномерному перемешиванию компонентов, уменьшают время цикла и снижают энергозатраты оборудования. Это позволяет

добиться высокой производительности при сохранении высокого качества продукта.

Формирование готовой смеси. Готовая смесь после смешивания поступает в бункер-накопитель для временного хранения. Из бункера смесь подается через питатель в распределительное устройство, которое разделяет поток на два направления: для упаковки навалом и фасовки. Смесь, предназначенная для погрузки навалом, загружается в крупнотоннажные емкости, такие как биг-бэги или контейнеры. Этот метод упаковки удобен для транспортировки больших объемов продукции. Смесь, предназначенная для фасовки, поступает в специализированные силосы, откуда она дозируется с помощью фасовочного устройства. Фасовка производится в мешки различного объема (например, 20–50 кг), что удобно для реализации продукции на рынке.

Упаковка и транспортировка. Фасованные мешки проходят через виброустройство, которое придает им прямоугольную форму. Это необходимо для удобства укладки мешков на паллеты и их последующей транспортировки. После этого роботизированный манипулятор автоматически укладывает мешки на паллеты с высокой точностью, минимизируя ручной труд и повышая производительность линии. Для защиты упакованной продукции от воздействия влаги используется термоусадочный колпак из специальной пленки. Колпак фиксируется на мешках с помощью теплового воздействия, что обеспечивает герметичность упаковки и предотвращает порчу продукции во время хранения и транспортировки.

Контроль качества. Контроль качества готовой продукции является важным этапом технологического процесса. Образцы смеси подвергаются испытаниям в специальной печи, где проверяются их физико-механические свойства. Это позволяет убедиться в соответствии продукции установленным стандартам и техническим требованиям. Готовая продукция хранится в условиях, исключающих воздействие влаги и высоких температур (не выше 40 °C), что

гарантирует сохранение ее эксплуатационных характеристик на протяжении длительного времени.

Экологическая безопасность. Производство сухих пенобетонных смесей организовано таким образом, чтобы минимизировать воздействие на окружающую среду. Для этого используются обеспыливающие камеры и узлы системы очистки воздуха, которые эффективно снижают выбросы пыли и других загрязняющих веществ в производственных помещениях и атмосферу. Эти меры обеспечивают соответствие производства современным экологическим стандартам.

Таким образом, технологический процесс производства сухих пенобетонных смесей представляет собой последовательность взаимосвязанных операций – от подготовки сырья до упаковки готовой продукции. Использование современных технологий дозирования, помола и автоматизации процессов позволяет обеспечить высокую производительность линии при сохранении стабильного качества продукта. Экологическая безопасность производства достигается за счет применения систем обеспыливания и очистки воздуха, что делает процесс не только эффективным, но и экологически чистым.

Предложена технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе разработанных сухих смесей, особенностью которой является затворение сухой смеси водой без использования пеногенератора, представленная на рисунке 5.2.

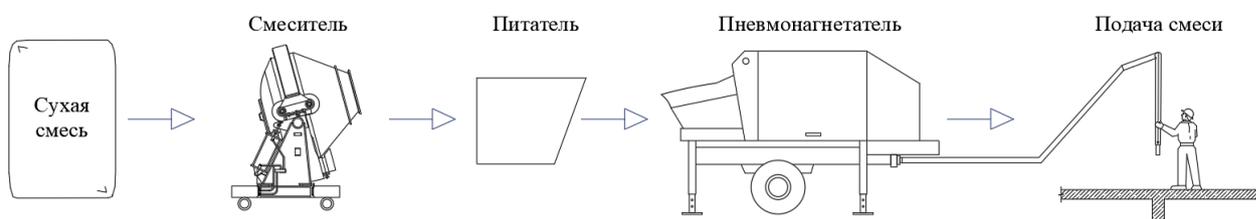


Рисунок 5.2 – Технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

Технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей включает последовательность взаимосвязанных процессов,

направленных на создание материала с заданными свойствами. Производство начинается с подготовки сухой смеси.

Далее сухие компоненты поступают в смеситель, где происходит их интенсивное перемешивание. Для этой цели используются лопастные или планетарные смесители, обеспечивающие равномерное распределение частиц. Время перемешивания варьируется в зависимости от состава, но обычно составляет 5-10 мин. На этом этапе критически важно исключить образование комков, так как неоднородность смеси негативно скажется на структуре пенобетона. Контроль качества промежуточного продукта проводится путем отбора проб и проверки на сыпучесть и отсутствие сегрегации компонентов.

Готовая сухая смесь подается через дозирующий питатель, регулирующий объем материала, поступающего в следующий технологический узел. Питатель обеспечивает стабильность процесса, предотвращая перегрузки и неравномерную подачу. Транспортировка смеси к зоне формования осуществляется с помощью пневмонагнетателя, который использует сжатый воздух для перемещения материала. Этот метод выбран из-за его эффективности: он минимизирует расслоение компонентов и позволяет транспортировать смесь на значительные расстояния без потери качества.

На этапе смешивания с водой сухая смесь объединяется с жидкостью в специальном смесителе-активаторе. Вода не только обеспечивает гидратацию цемента, но и активирует пенообразователь, запуская процесс формирования ячеистой структуры. Температура воды контролируется для оптимизации скорости реакции, а ее количество строго дозируется в соответствии с водоцементным отношением, указанным в рецептуре. Дополнительные добавки, такие как пластификаторы, могут вводиться на этом этапе для улучшения реологических свойств смеси. Полученная пеномасса имеет однородную консистенцию, что проверяется визуально и с помощью приборов, измеряющих вязкость.

Формование пенобетона осуществляется как в заводских, так и в полевых условиях, что значительно расширяет его применение. На производстве материал

заливается в металлические или полимерные формы, где в течение первых 10-20 мин происходит его расширение, заполнение объема и формирование закрытопористой структуры. Однако ключевой особенностью технологии является возможность прямой заливки пенобетона на стройплощадке, например, при теплоизоляции полов, перекрытий, кровель или стен. Это устраняет необходимость транспортировки готовых блоков и позволяет адаптировать материал к сложным геометрическим формам конструкций.

На строительном объекте подготовленная сухая смесь затворяется водой непосредственно в смесителе, после чего пеномасса подается через шланги в зону укладки. Перед заливкой основание очищается от мусора, при необходимости устанавливается опалубка, а также монтируются разделительные слои (например, гидроизоляционная пленка). Пенобетонная масса равномерно распределяется по поверхности, а ее расширение контролируется в реальном времени, что исключает образование пустот и обеспечивает монолитность слоя. Для теплоизоляции полов толщина заливки варьируется от 50 до 200 мм в зависимости от требуемого сопротивления теплопередаче.

После заливки материал проходит этап предварительного схватывания (1-2 ч), в течение которого формируется каркасная структура. В условиях стройплощадки критически важно поддерживать температуру в диапазоне 15-35 °С и защищать пенобетон от прямого солнечного излучения или осадков. Для ускорения твердения могут использоваться временные укрытия с регулируемым микроклиматом (например, тенты с подогревом). Полное отверждение происходит в течение 12-48 ч, после чего поверхность готова к дальнейшим отделочным работам – укладке стяжки, монтажу напольных покрытий или нанесению защитных составов.

Заключительный этап включает контроль качества готовой продукции. Проверяются механическая прочность на сжатие, плотность, теплопроводность и геометрические параметры блоков. Испытания проводятся как разрушающими методами (например, прессование образцов), так и неразрушающими

(ультразвуковой контроль). Соответствие стандартам подтверждается сертификатами. Готовые пенобетонные блоки упаковываются в термоусадочную пленку или деревянные поддоны, что защищает их от повреждений при транспортировке. Хранение осуществляется в сухих складах с защитой от прямого воздействия влаги и солнечных лучей.

Ключевым преимуществом данной технологической схемы производства теплоизоляционных пенобетонов на основе разработанных сухих смесей является отсутствие необходимости использования пеногенератора. Вместо этого пенообразование достигается за счет прямого затворения сухой смеси водой, что активирует встроенный пенообразователь, уже присутствующий в составе. Это упрощает процесс заливки, сокращает количество необходимого оборудования и снижает энергозатраты, делая производство более экономичным и доступным даже для малых предприятий. Технология сохраняет все преимущества сухих смесей: энергоэффективность (минимизация логистических расходов), гибкость рецептур (возможность варьировать долю перлита, микрокремнезема или модификаторов) и автоматизацию критических этапов (дозирование, транспортировка). Отсутствие пеногенератора также повышает стабильность процесса, так как пенообразование контролируется исключительно составом смеси и параметрами затворения, что снижает риски человеческих ошибок. Готовый пенобетон, обладая низкой теплопроводностью и экологической безопасностью, идеально подходит для утепления строительных конструкций, а упрощенная схема производства расширяет его применение в условиях ограниченных ресурсов.

5.2. Технико-экономическое обоснование эффективности производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей

В условиях растущего спроса на энергоэффективные строительные материалы производство теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей представляет собой перспективное направление, требующее комплексного анализа технических и экономических аспектов. Эффективность данной

технологии определяется не только свойствами конечного продукта, но и оптимизацией сырьевой базы, технологических процессов и управлением затратами.

Ключевой задачей технико-экономического обоснования эффективности производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей является оценка целесообразности перехода на выпуск сухих смесей, включая расчет себестоимости сырьевых компонентов, анализ особенностей их обработки и гомогенизации. Особое внимание уделяется технологическим требованиям к оборудованию, обеспечивающему точность дозировки и стабильность качества смесей, что напрямую влияет на их конкурентные преимущества.

Экономическая составляющая исследования охватывает снижение операционных издержек за счет исключения промежуточных этапов, характерных для традиционного производства пенобетона, оптимизации логистических цепочек и увеличения срока хранения продукции. Финансовый профиль проекта рассматривается через призму капитальных вложений в переоборудование линии и сроков окупаемости, что позволяет определить рентабельность внедрения технологии в текущих рыночных условиях.

Технологический процесс изготовления сухих ячеистобетонных смесей принципиально не отличался от общепринятых технологий, поэтому заработная плата, затраты труда и затраты на эксплуатацию покрытия по базовым и предлагаемым вариантам неизменны. В связи с этим производим расчет по стоимости материалов. В качестве разработанных составов рассмотрены многокомпонентные составы, описанные в таблице 4.9 (п. 4.2), в качестве базового состава рассмотрен цемент с добавлением пенообразователя, объем которого обусловлен рассматриваемой маркой по средней плотности. Сравнение материальных затрат на производство 1 т. сухих пенобетонных смесей по стоимости сырьевых материалов в сравнении с товарным составом сухой смеси для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D400$ (производства ООО «Совби») приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнение материальных затрат на производство 1 т. сухих пенобетонных смесей по стоимости сырьевых материалов

Материал	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Пенобетон марки по средней плотности <i>D400</i> на основе товарной смеси				
Цемент	кг	980,4	10,5	10294,2
ПО-6НП	л	9,8	105,6	1034,88
Elocrete	кг	9,8	160	1568
Итого				12897,08
Разработанный состав марки по средней плотности <i>D200</i>				
Цемент	кг	807,6	10,5	8479,8
Перлит	кг	95	14,7	1396,5
Микрокремнезем	кг	47,6	8,1	385,56
ПО-6НП	л	24,2	105,6	2555,52
Бentonитовая глина	кг	24,2	36	871,2
Elocrete	кг	1,6	160	256
Итого				13944,58
Разработанный состав марки по средней плотности <i>D250</i>				
Цемент	кг	820,8	10,5	8618,4
Перлит	кг	48,2	14,7	708,54
Микрокремнезем	кг	96,6	8,1	782,46
ПО-6НП	л	16,4	105,6	1731,84
Бentonитовая глина	кг	16,4	36	590,4
Elocrete	кг	1,6	160	256
Итого				12687,64
Разработанный состав марки по средней плотности <i>D300</i>				
Цемент	кг	834,4	10,5	8761,2
Перлит	кг	49	14,7	720,3
Микрокремнезем	кг	98,2	8,1	795,42
ПО-6НП	л	8,4	105,6	887,04
Бentonитовая глина	кг	8	36	288
Elocrete	кг	1,6	160	256
Итого				11707,96

Базовый состав марки *D400* характеризуется преобладанием затрат на цемент, который составляет основную долю себестоимости, дополненную пенообразователем и модификатором. Для марки по средней плотности *D200* наблюдается рост общих затрат из-за введения перлита и бентонитовой глины, частично компенсирующих сокращение цемента. Однако для марок по средней плотности *D250* и *D300* оптимизация компонентного состава, включая увеличение доли микрокремнезема и снижение расхода пенообразователя, позволяет добиться значительного снижения себестоимости. Наибольшая

экономическая эффективность достигнута для $D300$, где сочетание минеральных наполнителей и модификаторов обеспечивает баланс между стоимостью и функциональными свойствами.

Для оценки масштабируемости результатов проведен пересчет затрат на 1 м^3 материала с учетом плотности марок по средней плотности по формуле:

$$C = \frac{\sum(C_i \cdot K_i)}{M} \rho, \quad (5.1)$$

где C_i – цена за единицу измерения i -го компонента, руб.; K_i – количество i -го компонента на 1 м^3 смеси, кг; $M = 1000 \text{ кг}$ – масса смеси; ρ – плотность пенобетона, т/м^3 .

Пересчет на 1 м^3 материала с учетом плотности (формула 5.1) выявил следующее:

$$D400: (12\,897,08 / 1000) \times 400 = 5\,158,83 \text{ руб./ м}^3;$$

$$D200: (13\,944,58 / 1000) \times 200 = 2\,788,92 \text{ руб./ м}^3;$$

$$D250: (12\,687,64 / 1000) \times 250 = 3\,171,91 \text{ руб./ м}^3;$$

$$D300: (11\,707,96 / 1000) \times 300 = 3\,512,39 \text{ руб./ м}^3.$$

Экономический эффект при годовом объеме $100\,000 \text{ м}^3$ ($\mathcal{E}_{год}$) рассчитан по формуле:

$$\mathcal{E}_{год} = (C_{баз} - C_{разр}) \times B, \quad (5.2)$$

где $C_{баз}$, $C_{разр}$ – себестоимость 1 м^3 базового и разработанного составов, руб.; $B = 100\,000 \text{ м}^3$ – производительность.

Экономический эффект для каждой марки рассчитан относительно базового состава $D400$ (формула 5.2) при годовом объеме $100\,000 \text{ м}^3$:

$$D200: (5\,158,83 - 2\,788,92) \times 100\,000 = 236,99 \text{ млн руб./год};$$

$$D250: (5\,158,83 - 3\,171,91) \times 100\,000 = 198,69 \text{ млн руб./год};$$

$$D300: (5\,158,83 - 3\,512,39) \times 100\,000 = 164,64 \text{ млн руб./год}.$$

Суммарный эффект достигает 600,32 млн руб./год, что подчеркивает целесообразность применения модифицированных составов для марок с пониженной плотностью. Оптимизация компонентов (частичная замена цемента перлитом, микрокремнеземом и бентонитом) обеспечила снижение материалоемкости на 12-32% в зависимости от марки.

Оптимизация логистических процессов и снижение материалоемкости являются ключевыми факторами повышения конкурентоспособности строительных материалов. В контексте производства сухих пенобетонных смесей марки по средней плотности $D200$, $D250$ и $D300$ актуальным остается вопрос выбора оптимального варианта упаковки, обеспечивающего баланс между себестоимостью, удобством транспортировки и рыночным спросом. В данной работе проведена оценка экономического эффекта от фасовки смесей в биг-бэги массой 50, 500 и 1000 кг с учетом дополнительных затрат на упаковку и логистику.

Годовой объем производства принят равным 100 000 т. сухой смеси. Для оценки влияния упаковки на себестоимость рассмотрены четыре варианта: поставка навалом, а также фасовка в биг-бэги массой 50 кг, 500 кг и 1000 кг. Стоимость упаковки составила 80 руб. за биг-бэг 50 кг, 300 руб. за 500 кг и 500 руб. за 1000 кг. Логистические издержки добавлены к себестоимости в размере 12% для 50 кг, 8% для 500 кг и 5% для 1000 кг, тогда как для навала дополнительные расходы не учитываются. Себестоимость с учетом упаковки определена по формуле:

$$C_{\text{упак}} = C_{\text{навал}} + (N \times C_{\text{биг}}) + (C_{\text{навал}} \times k), \quad (5.3)$$

где $C_{\text{навал}}$ – себестоимость 1 т. без упаковки, N – количество биг-бэгов, $C_{\text{биг}}$ – цена упаковки, k – коэффициент логистики.

Сравнение годовой экономии для всех марок по средней плотности представлена в таблице 5.2.

Анализ экономической эффективности для различных марок пенобетона выявил четкую зависимость между выбором упаковки и уровнем рентабельности.

Для марки по средней плотности $D200$ наилучшие результаты достигнуты при использовании крупнотоннажных биг-бэгов, которые минимизируют логистические издержки и сохраняют большую часть экономии, полученной за счет оптимизации состава. Средние и малые форматы упаковки, хотя и остаются прибыльными, демонстрируют снижение эффекта из-за роста затрат на транспортировку и фасовку.

Таблица 5.2 – Сравнение годовой экономии на 100 000 тонн готовой продукции

Марка по средней плотности	Вариант упаковки			
	Навалом	Биг-бэги 50 кг	Биг-бэги 500 кг	Биг-бэги 1000 кг
$D200$	236,99	152,3	198,7	215,2
$D250$	198,69	115,8	165,4	185,1
$D300$	164,64	72,5	128,9	150,3

Для марки по средней плотности $D250$ тенденция сохраняется: крупная фасовка обеспечивает максимальную экономию, близкую к показателям поставки навалом, в то время как уменьшение размера упаковки закономерно увеличивает долю накладных расходов. При этом даже для данной марки, обладающей умеренной маржинальностью, переход на биг-бэги среднего и большого объема остается экономически оправданным.

Наиболее сложная ситуация наблюдается для марки по средней плотности $D300$, где изначально низкая рентабельность ограничивает потенциал экономии. Однако применение крупнотоннажных биг-бэгов позволяет выйти в зону положительного эффекта, компенсируя высокую материалоемкость за счет снижения логистических издержек.

Основным фактором стало внедрение биг-бэгов большого объема, которые сочетают низкие логистические затраты с удобством для крупных потребителей. Их использование позволяет сохранить до 90% экономического эффекта, достигнутого благодаря оптимизации рецептур. Замена части цемента минеральными добавками не только снизила себестоимость, но и сократила экологическую нагрузку, что соответствует глобальным трендам устойчивого строительства.

5.3. Внедрение и апробация результатов исследования

Для реализации результатов работы разработаны стандарт организации СТО 02066339-077-2024 «Сухие пенобетонные смеси» (Приложение Д) и Рекомендации по производству сухих пенобетонных смесей (Приложение Е). Обоснована

технико-экономическая эффективность модернизации технологии производства, обеспечивающей получения теплоизоляционного пенобетона *D200-D300, B0,35-B1*.

Промышленная реализация результатов исследования осуществлялась в ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород), где была выпущена партия сухих ячеистобетонных смесей.

Выпущенная партия сухих ячеистобетонных смесей была использована при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Лесная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. На указанном объекте проведена теплоизоляция полов. В качестве теплоизоляционного материала использовался теплоизоляционный пенобетон марки по средней плотности *D200* (содержание перлита составляло 10%; микрокремнезема – 5%).

При производстве работ использовались следующие материалы и оборудование:

1. Сухая пенобетонная смесь:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Белгородский цементный завод»;
- пенообразователь ПО-6НП;
- бентонитовая глина компании ТОО «ТАГБЕНТ»;
- суперпластификатор Elocrete;
- вспученный перлитовый песок ВПМ, М75 производства ООО «Промперлит»;
- микрокремнезем конденсированный МК-85 производства ООО «Химпром»;

2. Вода.

3. Бароустановка БАС500К2.

Теплоизоляция полов при строительстве индивидуального жилого дома приведена на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Теплоизоляция полов при строительстве индивидуального жилого дома

Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород) по производству сухих пенобетонных смесей (Приложение Ж).

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство»; магистров по направлению 08.04.01 – «Строительство» (Приложение И).

5.4. Выводы

1. Предложена технологическая схема производства сухих ячеистобетонных смесей для теплоизоляционных пенобетонов. Ключевым этапом технологии является совместный помол компонентов в роторно-шаровой мельнице, который повышает реакционную способность сырья и улучшает дисперсность смеси. Современные методы смешивания с использованием вибрационных устройств позволяют сократить время цикла и снизить энергоемкость процессов. Автоматизация упаковки, включая роботизированные манипуляторы и

термоусадочные колпаки, минимизирует ручной труд и повышает производительность.

2. Предложена технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей, особенностью которой является затворение сухой смеси водой без использования пеногенератора, что упрощает процесс заливки пенобетона в производственных условиях.

3. Обоснована технико-экономическая эффективность модификации сухих пенобетонных смесей за счет введения минеральных добавок. Установлено, что частичная замена цемента микрокремнеземом и перлитом позволяет снизить себестоимость материала на 12-32% в зависимости от марки.

4. Установлено, что применение биг-бэгов массой 1000 кг доказало свою эффективность для всех марок, обеспечивая сохранение 90-93% экономии за счет минимальных логистических издержек, которые составляют всего 5% от себестоимости. В то же время фасовка в упаковку по 50 кг оказалась наименее выгодной из-за высоких накладных расходов, особенно для низкомаржинальной марки *D300*, где экономический эффект сокращается до 44%.

5. Результаты исследований апробированы при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Лесная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ», где была проведена теплоизоляция полов с использованием разработанной сухой ячеистобетонной смеси. Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород) по производству сухих пенобетонных смесей. Для практического использования результатов работы разработаны стандарт организации СТО 02066339-077-2024 «Сухие пенобетонные смеси» Рекомендации по производству сухих пенобетонных смесей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей с применением минеральных добавок и стабилизированных пенообразующих компонентов.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей за счет рационального подбора сырьевых компонентов (цемента, минеральных добавок – микрокремнезема и вспученного перлитового песка), их предварительную механоактивации для достижения удельной поверхности 700–850 м²/кг, перевода жидкого пенообразователя в сухое состояние гидратационным методом, применения бентонитовой глины в качестве стабилизатора пены, а также формирования однородной пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов с полидисперсным распределением пор при создании полифазной системы композиции вяжущего и стабилизированного пенообразующего компонента, что обеспечивает низкую среднюю плотность (202–296 кг/м³) и теплопроводность (0,06–0,07 Вт/(м·К)) материала при достаточной прочности на сжатие (0,50–1,17 МПа).

Установлены закономерности влияния минеральных добавок на микроструктуру цементного камня: перлит формирует механически закрепленную систему за счет проникновения гидратных новообразований в его поры, исключая дефекты расслоения; микрокремнезем индуцирует образование низкоосновного С-S-H геля повышенной плотности, снижая содержание портландита. Совместное использование микрокремнезема и вспученного перлитового песка в цементной матрице создает полифазную систему (эттрингит, С-S-H гель), что повышает прочность цементного камня.

Развита система контроля и оценки качества макропористой структуры теплоизоляционных пенобетонов, в том числе с использованием методов фрактального анализа, основанная на применении аморфного углерода в качестве

контрастного агента для заполнения пор, включающий бинаризацию цифровых изображений поверхности материала, где поры, заполненные углеродом, идентифицируются по интенсивности пикселей при определении параметров пористости материала. Выявлена функциональная взаимосвязь между распределением пор по размерам, их морфологией, пространственной организацией и фрактальной размерностью, позволяющие количественно оценивать степень лакуарности пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов.

Дополнены теоретические представления о применении методов фрактального анализа для оценки качества пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов, а также о корреляции фрактальной размерности со степенью лакуарности систем моно- и гетеродисперсной упаковки пор.

Предложены режимы механоактивации сырьевых компонентов сухих смесей, направленные на повышение реакционной способности сырья и однородности структуры. По совокупности факторов проведено ранжирование помольных агрегатов по степени повышения эффективности их использования: вибрационная мельница → вихревая струйная мельница → роторно-шаровая мельница. Экспериментально подтверждено, что применение роторно-шаровой мельницы обеспечивает достижение удельной поверхности сырьевых компонентов теплоизоляционных пенобетонов 700–850 м²/кг при минимальной продолжительности помола.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения 10% микрокремнезема и 5% вспученного перлитового песка в качестве минеральной добавки для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D300$; 5% микрокремнезема и 10% вспученного перлитового песка в качестве минеральных добавок для теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности $D200$ и $D250$, рекомендуемых для утепления стен с несущим каркасом, чердачных перекрытий, полов по лагам, плоских кровель и мансард.

Предложены технологическая схема производства сухих пенобетонных смесей, основанная на совместном помоле компонентов в роторно-шаровой мельнице, и технологическая схема производства теплоизоляционных пенобетонов на основе разработанных сухих смесей, особенностью которой является затворение сухой смеси водой без использования пеногенератора, что упрощает процесс заливки пенобетона в производственных условиях.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности предприятий по производству сухих ячеистобетонных смесей и изделий на их основе, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований: целесообразно рассматривать в направлении оптимизации составов сухих пенобетонных смесей за счет внедрения альтернативных минеральных добавок, включая отходы промышленного производства для снижения себестоимости и повышения экологичности материала, а также совершенствования методов анализа пористой структуры на основе фрактальной геометрии, в том числе моделирования кубических структур, для прогнозирования взаимосвязи между архитектурой пор, прочностью и теплофизическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распоряжение Правительства РФ* от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 24. – С. 3847.
2. *Постановление Правительства РФ* от 19.09.2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2023. – № 38. – С. 6906.
3. *Постановление Правительства РФ* от 15.04.2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2014. – № 18 (ч. III). – С. 2167.
4. *World Energy Outlook 2024*. IEA, Paris. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024#overview>
5. *СП 50.13330.2012* Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введ. 01.07.2013. – М.: Минрегион России. – 2012.
6. *Федеральный закон РФ* от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года). – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – С. 5711.
7. *Постановление Правительства РФ* от 27.09.2021 г. № 1628 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов». – 2021. – № 40. – С. 6851.

8. *Sadriev, A. R.* World Patent Practice Analysis in the Area of Energy-Efficient and Energy-Saving Technologies / A. R. Sadriev // Mediterranean Journal of Social Sciences. – 2014. – Vol. 5(18). – P. 283-288.

9. *Гущин, С. В.* Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С. В. Гущин, А. С. Семиненко, Ч. Шень // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 5. – С. 31-43.

10. *Wagh, Ch.* Thermal Properties of Foamed Concrete: A Review / Ch. Wagh, A. Kamiset, I. S. R. Gandhi // 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development. – 2020. – Vol. 29. – P. 113-127.

11. *Revel, G. M.* Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment / G. M. Revel, E. Sabbatini, M. Arnesalo // Measurement Science and Technology. – 2012. – Vol. 23. – P. 035005.

12. *Гагарин, В. Г.* Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 192–200.

13. *Miller, D.* The contribution of structural design to green building rating systems: An industry perspective and comparison of life cycle energy considerations / D. Miller, J.-H. Doh, K. Panuwatwanich // Sustain Cities Soc. – 2015. – Vol. 16. – P. 39-48.

14. *Ли, Ц.* Текущая ситуация и развитие управления проектами «зеленого» строительства / Ц. Ли, Л. И. Миронова // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 399-402.

15. *Zeng, M. N.* Future of green BIM designing and tools / M. N. Zeng // Adv. Mater. Res. – 2012. – Vol. 374. – P. 2557-2561.

16. *Теличенко, В. И.* Создание национальной системы «Зеленых» стандартов в РФ / В. И. Теличенко, А. А. Бенуж, Д. Н. Морозов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2019. – №3-4(242-243). – С. 10-11.

17. *Альжанова, А. Ж.* Влияние составов сухих строительных смесей на технические свойства строительных материалов / А. Ж. Альжанова, А. К. Зайнутдинов, Б. К. Сарсенбаев // Управление инновациями: теория, методология, практика. – 2016. – № 18. – С. 56-59.

18. *Немахов, И. В.* Получение сухих строительных смесей с оптимальными физико-механическими свойствами / И. В. Немахов // Аллея науки. – 2018. – Т. 3, № 8(24). – С. 256-259.

19. *Turgunbayev, U.* Dry mixes in modern construction using local raw materials and polymer additives / U. Turgunbayev, D. Sharipova // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 452. – P. 06025.

20. *Логанина, В. И.* Нормативная обеспеченность качества сухих строительных смесей / В. И. Логанина, Е. И. Куимова, Т. В. Учаева // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1(36). – С. 37-41.

21. *Логанина, В. И.* Оценка достоверности контроля производства сухих строительных смесей / В. И. Логанина, Е. И. Куимова, М. В. Зайцева // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1(46). – С. 54-62.

22. *ГОСТ 31189-2015* Смеси сухие строительные. Классификация (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.

23. *ГОСТ 31358-2019* Смеси сухие строительные напольные. Технические условия (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 18 с.

24. *ГОСТ Р 56387-2018* Смеси сухие строительные клеевые на цементном вяжущем. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

25. *ГОСТ Р 58272-2018* Смеси сухие строительные кладочные. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

26. *Овчинникова, М. С.* Анализ классификаций сухих строительных смесей / М. С. Овчинникова, Е. Н. Власова // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2019. – № 1-2. – С. 18-20.

27. *Логанина, В. И.* Оценка качества сухих строительных смесей с учетом вариабельности сырья / В. И. Логанина, Е. И. Куимова, М. В. Зайцева, Д. К. Галкина // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 74-77.

28. URL: <https://agroan.ru/wp-content/uploads/2024/12/ved382450.pdf>

29. *Рыкова, К. А.* Анализ отечественного рынка специализированных сухих строительных смесей / К. А. Рыкова, А. М. Усачев // Инновации, технологии и бизнес. – 2022. – № 1(11). – С. 60-62.

30. *Ботка, Е. Н.* Рынок сухих строительных смесей России: итоги полугодия / Е. Н. Ботка // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 15-17.

31. *Доронина, Е. В.* Анализ рынка сухих строительных смесей / Е. В. Доронина, М. П. Веремьева, Н. И. Татаринцев // Московский экономический журнал. – 2019. – № 5. – С. 33.

32. URL: https://www.megaresearch.ru/new_reality/rossiyskiy-rynok-suhih-stroitelnyh-smesey-est-li-svobodnye-nishi.

33. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-construction-chemicals-market/15276>.

34. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/ready-mix-concrete-market>.

35. *Сулейманова, Л. А.* Газобетоны неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Сулейманова Людмила Александровна. – Белгород, 2013. – 390 с.

36. *Мартынов, В. И.* Анализ структурообразования и свойств неавтоклавного пенобетона / В. И. Мартынов, Н. Выровой В, Д. А. Орлов // Строительные материалы. – 2005. – № 1. – С. 48.

37. *Сулейманова, Л. А.* Вибровакуумированные гипсосодержащие композиты / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. В. Марушко, Н. В. Огнев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 62-66.

38. *Гладков, Д. И.* Вибровакуумная технология ячеистых бетонов / Д. И. Гладков, Л. А. Ерохина, Л. Х. Загороднюк // Бетон и железобетон. – 1991. – № 9. – С. 13.

39. *Жуков, А. Д.* Геометрическая модель ячеистого бетона и прогнозирование его свойств / А. Д. Жуков, А. В. Чугунков, П. К. Гудков // Строительство: наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 2.

40. *Погорелова, И. А.* Оптимизация структуры ячеистого бетона / И. А. Погорелова, О. А. Печерина, О. В. Стадник // Университетская наука. – 2017. – № 2 (4). – С. 19-21.

41. *Qu, X. L.* Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review / X. L. Qu, X. G. Zhao // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 135. – P. 505-516.

42. *Li, H. D.* Effect of pore shape on thermal conductivity of partially saturated cement-based porous composites / H. D. Li, Q. Zeng, S. L. Xu // Cement and Concrete Composites. – 2017. – Vol. 81. – P. 87-96.

43. *Сактаганова, Н. А.* Неавтоклавный ячеистый бетон с добавкой – поверхностно-активными веществами / Н. А. Сактаганова // Наука и техника Казахстана. – 2016. – № 1-2. – С. 58-61.

44. *Neithalath, N.* Structure and properties of aerated concrete: A review / N. Neithalath, K. Ramamurthy // Cement and Concrete Composites. – 2000. – Vol. 22. – P. 321-329.

45. *Погорелова, И. А.* Сухие строительные смеси для неавтоклавных ячеистых бетонов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Погорелова Инна Александровна. – Белгород, 2009. – 195 с.

46. *Федынин, Н. И.* Технология неавтоклавного ячеистого золобетона повышенной прочности и долговечности / Н. И. Федынин // Строительные материалы. – 1990. – № 11. – С. 8-11.

47. *Грушевский, А. Е.* Технология и оборудование для малых предприятий / А. Е. Грушевский, В. П. Балдин // *Строительные материалы*. – 1994. – № 1. – С. 7-9.

48. *Попова, Е. А.* Получение неавтоклавного пенобетона повышенного качества с учетом природы вводимых добавок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Попова Елена Андреевна. – Санкт-Петербург, 2006. – 190 с.

49. *Сапелин, Н. А.* Теоретическая зависимость прочности бетонов на основе неорганических вяжущих от объемной массы / Н. А. Сапелин, А. Ф. Бурьянов, А. В. Бортников // *Строительные материалы*. – 2001. – № 6. – С. 36-38.

50. *Меркин, А. П.* Пенобетон «сухой минерализации» для монолитного домостроения / А. П. Меркин // *Изв. вузов. Строительство*. – 1993. – № 9. – С. 56-58.

51. *Кобидзе, Т. Е.* Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона / Т. Е. Кобидзе, А.Ю. Киселев, С.В. Листов // *Строительные материалы*. – 2005. – № 1. – С. 27-29.

52. *Прищепа, И. А.* Влияние концентрации пенообразователя на кратность и стойкость пены / И. А. Прищепа, А. С. Антипов, М.В. Толченников, Б.А Прищепа // *Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМСТ-2014): материалы Международной научной конференции молодых ученых*. – Томск: ТГАСУ, 2014. – С. 19-22.

53. *Ромахин, В. А.* Интенсификация роста сырцово-прочности пенобетона на цементном вяжущем: дис.... канд. техн. наук: 05.23.05 / В. А. Ромахин. – Всероссийский научно-исследовательский институт строительных материалов и конструкций им. П. П. Будникова. – Москва, 2006. – 173 с.

54. *Назарова, А. В.* Модифицированные пенобетоны неавтоклавного твердения в современном строительном производстве: коллективная монография / А. В. Назарова, С. В. Сороканич, Е. М. Вишторский, А. А. Ткачев. – М.: ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. - 98 с.

55. *Измалкова, Е. В.* Структурообразование и свойства мелопенобетонов с одностадийной поризацией смеси в турбулентных смесителях: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / Измалкова Елена Викторовна. – Ростовский государственный строительный университет. – Ростов-на-Дону, 2000. – 186 с.

56. *Костыленко, К. И.* Закономерности обеспечения структурной устойчивости пенобетонных смесей: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.05 / Костыленко Константин Игоревич. – Ростовский государственный строительный университет. – Ростов-на-Дону, 2014. – 145 с.

57. *Ружинский, С. А.* Все о пенобетоне / С. А. Ружинский, А. Б. Портник, А. В. Савиных. – С-Пб.: ООО «Стройбетон», 2006. – 630 с.

58. *Самченко, С. В.* Влияние баритсодержащей добавки на свойства ячеистых бетонов / С. В. Самченко, Н. В. Новиков // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 335-341.

59. *Самченко, С. В.* Влияние содержания комплексных добавок на деформационные характеристики цемента / С. В. Самченко, Д. А. Зорин, З. Т. Л. Нгуен, В. Л. Танг // Строительство: наука и образование. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 137-151.

60. *Моргун, Л. В.* Влияние заполнителей на технологические свойства пенобетонных смесей / Л. В. Моргун, Б. К. Гебру, В. В. Нагорский // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 12 (780). – С. 18-24.

61. *Половова, Э. А.* Перспектива применения пенобетонов неавтоклавного твердения / Э. А. Половова, Л. А. Куршпель // Архитектон: известия вузов. – 2010. – № 3(31). – С. 12.

62. *Баженов Ю. М.* Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.

63. *Воронов, В. В.* Пенобетоны на основе композиционных вяжущих: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Воронов Василий Васильевич. – Белгород, 2020. – 195 с.

64. *Шахова, Л. Д.* Технология пенобетона. Теория и практика: монография / Л. Д. Шахова. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 248 с.

65. *Кауфман, Б. Н.* Производство и применение пенобетона в строительстве / Б. Н. Кауфман. – М.: Госстройиздат, 1940. – 129 с.

66. *Казаков, Ю. Н.* Малоэтажные градостроительные комплексы с энергосберегающими строительными системами и ячеистыми бетонами / Ю. Н. Казаков // Ячеистые бетоны в современном строительстве: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2004. – С. 54–61.

67. *Ли, Ф. М.* Химия цемента и бетона / Ф. М. Ли: пер. с англ. – М.: Госстройиздат, 1977. – 159 с.

68. *Ребиндер, П. А.* Поверхностные явления в дисперсных системах: Коллоидная химия. Избранные труды / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1978. – 368 с.

69. *Амбразон, А. А.* Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение / А. А. Амбразон. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.

70. *Кривобородов, Ю. Р.* Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента / Ю. Р. Кривобородов, А. А. Еленова // Строительные материалы. – 2016. – № 9. – С. 65-67.

71. *Беседин, П. В.* Некоторые направления энергосбережения в производстве цемента / П. В. Беседин, П. А. Трубаев, О. А. Панова, Б. М. Гришко // Цемент и его применение. – 2011. – № 2. – С. 130-134.

72. *Ingam, K. D.* A review of limestone additions to Portland cement and concrete / K. D. Indam, K. E. Daugherty // Cement and Concrete Composites. – 1991. – No 13 – P. 165–170.

73. *Павленко, Н. В.* Особенности получения рациональной поровой структуры пенобетона на основе наноструктурированного вяжущего / Н. В. Павленко, А. В. Череватова, В. В. Строкова // Строительные материалы. – 2009. – № 10. – С. 33–36.

74. *Шапвалов, Н. А.* Микроструктура продуктов гидратации цемента, содержащего отходы флотационного обогащения железных руд /

Н. А. Шаповалов, Л. Х. Загороднюк, А. Ю. Щекина, М. С. Агеева, О. С. Ивашова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 57–63.

75. *Нориев, В. И.* Особобоыстротвердеющее магнезиальное вяжущее. Ч. 2. / В. И. Нориев, И. Н. Медведев // Цемент и его применение. – 1997. – № 1. – С. 33-36.

76. *Sasovsky, T. A.* Methods of cellular concrete production using fly ash / T. A. Sasovsky, I. V. Chorna, S. V. Shalay, O. M. Lysiak // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2021. – No. 82. – P. 114-122.

77. *Степанова, И. Б.* Строительно-технические свойства тонкомолотых многокомпонентных цементов и бетона на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Степанова Ирина Борисовна. – М., 1994. – 263 с.

78. *Зайченко, Н. М.* Высокопрочные тонкозернистые бетоны с комплексно модифицированной микроструктурой: монография / Н. М. Зайченко. – Макеевка: ДонНАСА, 2009. – 207 с.

79. *Павленко, Н. В.* Пенобетон на основе наноструктурированного вяжущего: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Павленко Наталья Викторовна. – Белгород, 2009. – 200 с.

80. *Федынин, Н. И.* Получение быстротвердеющего неавтоклавного ячеистого золобетона пониженной объемной массы / Н. И. Федынин, С. И. Меркулова // Строительные материалы. – 1979. – № 1. – С. 16–18.

81. *Крохин, А. М.* Физико-технические свойства и технология ячеистобетонных изделий на основе ВНВ и ТМЦ / А. М. Крохин // Бетон и железобетон. – 1993. – № 12. – С. 7–8.

82. *Батраков, В. Г.* Бетоны на вяжущих низкой водопотребности / В. Г. Батраков // Бетон и железобетон. – 1988. – № 11. – С. 4–6.

83. *Бабаев, Ш. Т.* Высокопрочные цементные композиции на основе ВНВ / Ш. Т. Бабаев, Н. Ф. Башлыков, И. Я. Гольдина // Бетон и железобетон. – 1990. – № 2. – С. 8–10.

84. *Коломацкий, С. А.* Теплоизоляционный пенобетон на высокодисперсных цементах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Коломацкий Сергей Александрович. – Белгород: БелГТАСМ, 2001. – 155 с.

85. *Сулейманова, Л. А.* Сухие строительные смеси для неавтоклавных ячеистых бетонов / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, В. В. Строкова. – Белгород: КОНСТАНТА, 2009. – 144 с.

86. *Вишневская, Я. Ю.* Энергоемкость процессов синтеза композиционных вяжущих в зависимости от генезиса кремнеземсодержащего компонента / Я. Ю. Вишневская, В. С. Лесовик, Н. И. Алфимова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 53–56.

87. *Лесовик, В. С.* Влияние состава сырья на свойства безавтоклавных силикатных материалов / В. С. Лесовик, А. А. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 1. – С. 10–15.

88. *Шкарин, А. В.* Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах / А. В. Шкарин, Л. Х. Загороднюк, А. Ю. Щекина, И. Г. Лугинина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 53–57.

89. *Шмитько, Е. И.* Химия цемента и вяжущих веществ: учеб. пособие / Е. И. Шмитько, А. В. Крылова, В. В. Шаталова. – Воронеж: Воронеж. гос. архитектурно-строит. ун-т, 2005. – 164 с.

90. *Bouglada, M.* Optimization of Cellular Concrete Formulation with Aluminum Waste and Mineral Additions / M. Bouglada, N. Ammar, B. Larbi // Civil Engineering Journal. – 2021. – Vol. 7. – P. 1222-1234.

91. *Fabien, A.* Effect of several parameters on non-autoclaved aerated concrete: use of recycling waste perlite / A. Fabien, N. Sebaibi, M. Boutouil // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2019. – Vol. 26. – P. 58-75.

92. *Jiang, J.* Pore Formation and Performance Enhancement of Nanopore-Rich High Porosity Aerated Cement via Nanomontmorillonite / J. Jiang, Z. Lu, J. Li, Y. Xie, K. Luo, Y. Niu // Constr. Build. Mater. – 2019. – Vol. 199. – P. 72–81.

93. *Eberl, D. D.* Alkali Cation Selectivity and Fixation by Clay Minerals / D. D. Eberl // *Clays and Clay Minerals*. – 1980. – Vol. 28(3). – P. 161-172.

94. *Taylor, H. F. W.* Cement chemistry / H. F. W. Taylor. – London. Thomas Telford Publishing, 1997. – 459 p.

95. *Kumar, S.* Engineering properties of bentonite stabilized with lime and phosphogypsum / S. Kumar, B. Mohanty // *Slovak Journal of Civil Engineering*. – 2015. – Vol. 22(4). – P. 35-44.

96. *Тотурбиев, Б. Д.* Композиционные строительные материалы из нерудного сырья мезозойско-кайнозойских осадочных толщ / Б. Д. Тотурбиев, С. А. Мамаев, А. Б. Тотурбиев // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. – 2020. – № 6(49). – С. 37–43.

97. *Белов, В. В.* Влияние сверхкислых зол ТЭС и модифицирующих добавок на физико-механические свойства неавтоклавного поробетона / В. В. Белов, Ю. Ю. Курятников // *Научный Вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. – 2008. – № 2. – С. 38–43.

98. *Волженский, А. В.* Применение зол и шлаков в производстве строительных материалов / А. В. Волженский, И. А. Иванов, Б. Н. Виноградов. – М.: Стройиздат, 1984. – 255 с.

99. *Волженский, А. В.* Шлаки и золы в производстве ячеисто-бетонных изделий / А. В. Волженский, К. В. Гладких, И. Ю. Данилович // *Строительные материалы*. – 1969. – № 8. – С. 32-33.

100. *Аль-Маршди К.* Влияние порядка смешивания компонентов цементной пасты на ее технологические свойства / К. Аль-Маршди // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. – 2014. – Вип. 53. – С. 191-197.

101. *Зайченко, Н. М.* Твердение цемента с комплексной органоминеральной расширяющей добавкой/ Н. М. Зайченко, А. В. Назарова, Ал-Маршди Косай С. Ради // *Вестник ДонНАСА*. – Вып. 3(119). – Макеевка, 2016. – С. 13-21.

102. *Назарова, А. В.* Влияние кремнеземистого компонента и условий твердения на прочностные показатели пенобетонов неавтоклавного твердения /

А. В. Назарова, Е. М. Вишторский, О. Б. Конев // Вестник ЛГУ имени Владимира Даля. – 2021. – № 12(54). – С. 34-37.

103. *Шахова, Л. Д.* Роль пенообразователей в технологии пенобетонов / Л. Д. Шахова // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 17-20.

104. *Иваницкий, В. В.* Новый вид пенообразователя для производства пенобетона / В. В. Иваницкий, А. В. Бортников, В. Ю. Гаравин, А. И. Бугаков // Строительные материалы. – 2001. – № 5. – С. 35-36.

105. *Иванов, И. А.* Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона / И. А. Иванов, В. М. Жмыхов // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 33-35.

106. *Федорова, Н. К.* Технология приготовления пенобетонов на основе пенообразователя «Синтепор» / Н. К. Федорова, А. С. Буланов // Строительные материалы. – 2005. – № 1. – С. 30-31.

107. *Лотов, В. А.* Влияние хлористого натрия и углекислого кальция на реологические характеристики синтетических пенообразователей в производстве пенобетона / В. А. Лотов, Е. А. Сударев // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 3. – С. 50-52.

108. *Щербин, С. А.* О концентрации пенообразователя при производстве пенобетона / С. А. Щербин, П. С. Горбач, А. И. Савенков // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2010. – Т. 1. – С. 35-035.

109. *Горбач, П. С.* Выбор концентрации пенообразователя при производстве пенобетона / П. С. Горбач, С. А. Щербин // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2011. – Т. 1. – С. 22-022.

110. *Кучерявенко, Д. А.* Свойства пенобетона неавтоклавно твердения с использованием белкового пенообразователя / Д. А. Кучерявенко // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки: Материалы международной научно-практической конференции: электронный ресурс. – Омск: ФГБОУ ВО

«Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», 2014. – С. 50-52.

111. *Алешин, Н. Д.* Влияние пенообразователя на степень поризации пенобетона на основе золы Калтанской ГРЭС / Н. Д. Алешин, В. Ф. Панова // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения, Новокузнецк, 04–07 мая 2010 года / Под общей редакцией Л.П. Мышляева. Том IV. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2010. – С. 223-226.

112. *Кривальцевич, Т. В.* Влияние природы пенообразователя на свойства пенобетона / Т. В. Кривальцевич // Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых: материалы Международной научно-практической конференции. – Омск: ФГБОУ ВО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)», 2016. – С. 151-156.

113. *Теунаева, Ф. С.* Исследование рациональной концентрации пенообразователя в технологии ячеистых пенобетонов / Ф. С. Теунаева // Девелопмент и инновации в строительстве: сборник статей Международного научно-практического конгресса. – Краснодар: ООО "ОМЕГА САЙНС", 2018. – С. 278-281.

114. *Бартеньева, Е. А.* Роль пенообразователей в технологии пенобетона / Е. А. Бартеньева // Актуальные вопросы строительства: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск: Сибстрин, 2016. – С. 225-231.

115. *Ахметгареева, А. К.* Пенообразователь для получения пенобетонов неавтоклавного твердения / А. К. Ахметгареева, В. А. Никонов, Г. Ф. Разумова // Строительные материалы. – 2003. – № 10. – С. 18.

116. *Шлегель, И. Ф.* Порошкообразный белковый пенообразователь «Омпор-Люкс» / И. Ф. Шлегель, Г. Я. Шаевич, Л. А. Карabut, А. А. Краснов // Строительные материалы. – 2008. – № 6. – С. 48–50.

117. *Большаков, В. И.* Необходимые свойства пенообразователей для производства пенобетона // В. И. Большаков, В. А. Мартыненко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2003. – № 4. – С. 101–104.

118. *Юндин, А. Н.* О взаимодействии некоторых пенообразователей с насыщенным раствором гидроксида кальция / А. Н. Юндин, Е. В. Кучуев // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 3. – С. 24–28.

119. *Горбач, П. С.* Оценка влияния протеинового и синтетического пенообразователей на прочность цементной матрицы и пенобетона / П. С. Горбач, А. И. Савенков, А. А. Баранова // Вестник АГТА. – 2014. – № 8. – С. 176-180.

120. *Шахова, Л. Д.* Повышение эффективности производства неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05 / Шахова Любовь Дмитриевна. – М., 2007. – 416 с.

121. *Хаскова, Т. Н.* Пены, кинетика роста кратности / Т. Н. Хаскова, П. М. Кругляков // Коллоидный журнал. – 1989. – Т.51, № 2. – С. 325-332.

122. *Raj, A.* Physical and functional characteristics of foam concrete: a review / A. Raj, D. Sathyan, K. M. Mini // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 221. – P. 787-799.

123. *Вишторский, Е. М.* Проблемы совместимости поверхностно-активных веществ разнонаправленного действия при производстве неавтоклавных пенобетонов / Е. М. Вишторский // Научный вестник ГОУ ЛНР ЛНАУ. – 2019. – № 6-1. – С. 239 - 245.

124. *Стешенко, А. Б.* Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой / А. Б. Стешенко, А. И. Кудяков // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 2 (54). – С. 56-62.

125. *Изотов, В. С.* Химические добавки для модификации бетона / В. С. Изотов, Ю. А. Соколова. – М.: ПАЛЕОТИП, 2006. – 244 с.

126. *Вовк, А. И.* Адсорбция суперпластификаторов на продуктах гидратации минералов портландцементного клинкера. Закономерности процесса и строение

адсорбционных слоев / А. И. Вовк // Коллоидный журнал. – 2000. – Т. 62, № 2. – С. 161-169.

127. *Осипов, С. П.* Компьютерная томография пенобетона / С. П. Осипов, И. А. Прищепа, А. И. Кудряков // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2(38). – С. 146-152.

128. *Вылегжанин, В. П.* Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность / В. П. Вылегжанин, В. А. Пинскер, Т. М. Петрова // Строительные материалы. – 2021. – № 8. – С. 67–71.

129. *Kravcov, A.* Laser-Ultrasonic Testing of the Structure and Properties of Concrete and Carbon Fiber-Reinforced Plastics / A. Kravcov, P Svoboda., A. Konvalinka, E. Cherepetskaya, A. Karabutov, D. Morozov, I. Shibaev // Key Engineering Materials. – 2016. – No 722. – P. 267-272.

130. *Kim, B.* Characterization of ultrasonic properties of concrete / B. Kim, J. Kim // Mechanics Research Communications. – 2009. – No 36. – P. 207-214.

131. *Бойчук, А. С.* Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом / А. С. Бойчук, В. Ю. Чертищев, И. А. Диков, А. С. Генералов // Труды ВИАМ. – 2017. – №7 (55). – С. 102-109.

132. *Cherepetskaya, E. B.* Study of porosity of sedimentary rock samples by nuclear magnetic resonance and laser- ultrasound diagnostics / E. B. Cherepetskaya, Ia. O. Zalevskii // МИАВ. Mining Inf. Anal. Bull. – 2023. – No (8). – P. 63-71.

133. *Sokhansefat, G.* Using X-ray Computed Tomography to Investigate Mortar Subjected to Freeze-Thaw Cycles / G. Sokhansefat, M. Moradian, M. Finnell, A. Behravan, M. Ley, C. Lucero, W. Weiss // Cement and Concrete Composites. – 2020. – No 108. – P. 103520.

134. *Lange, D. A.* Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials / D. A. Lange, H. M. Jennings, S. P. Shah // Cement and Concrete Research. – 1994. – No 24(5). – P. 841–853.

135. *Speranzini, E.* Image Analysis Technique for Material Behavior Evaluation in Civil Structures / E. Speranzini, R. Marsili, M. Moretti, G. Rossi // *Materials*. – 2017. – Vol. 10. – P. 1.

136. *Бедарев А. А.* Возможности компьютерного анализа макроструктуры ячеистого бетона и его практическая реализация / А. А. Бедарев // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2010. – № 2. – С. 39-44.

137. *Жуков, А. Д.* Композиционные материалы с регулируемой пористостью / А. Д. Жуков, И. В. Бессонов, А. Н. Сапелин, Р. М. Мустафаев // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – № 6. – С. 58-61.

138. *Захаров, А. Г.* Энергетические соотношения в системе пора - газ и их влияние на адсорбцию газов пористыми углеродсодержащими материалами / А. Г. Захаров // *Химия твердого топлива*. – 2005. – № 4. – С. 72-84.

139. *Умняков, П. Н.* Влияние инфильтрации и эксфильтрации на теплозащиту ограждающих конструкций при учете пористости материалов / П. Н. Умняков // *Жилищное строительство*. – 2014. – № 10. – С. 46-50.

140. *Пиотровская, Е. М.* Моделирование адсорбции азота в порах графита при переходе от микропор к мезопорам методом Монте-Карло / Е. М. Пиотровская, Е. Н. Бродская // *Журнал физической химии*. – 2001. – Т. 75, № 10. – С. 1846-1849.

141. *Mandelbrot, B. B.* The Fractal Geometry of Nature / B. B. Mandelbrot. – N. Y.: Freeman, 1982. – 468 p.

142. *Cai, J.* An introduction to fractal-based approaches in unconventional reservoirs – part I / J. Cai, L. Zhang, Y. Ju, G. Pia, Z. Zhang // *Fractals*. – 2018. – Vol. 26(2). – P. 1802001.

143. *Kim, J.* A fractal-based approach for reconstructing pore structures of GGBFS-blended cement pastes / J. Kim, S. Choi // *Construction Building Materials*. – 2020. – Vol. 265. – P. 120350.

144. *Cheny, Y.* Compressive strength of fractal-textured foamed concrete / Y. Cheny, F. Xu // *Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society*. – 2019. – Vol. 27, No. 1. – P. 1940003.

145. *Konkol, J.* The use of fractal geometry for the assessment of the diversification of macro-pores in concrete / J. Konkol, G. Prokopski // *Image Analysis & Stereology*. – 2011. – Vol. 30, No. 2. – P. 89-100.

146. *Fu, J.* Experimental study on pore characteristics and fractal dimension calculation of pore structure of aerated concrete block / J. Fu, Y. Yu // *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – No 2. – P. 1-11.

147. *Alfonso, I.* Fractal dimension determination of rock pores by multi-scale analysis of images obtained using OM, SEM and XCT / I. Alfonso, A. Beltran, M. Abatal // *Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society*. – 2018. – Vol. 26, No. 5. – P. 1850067.

148. *Гийон, Э.* Фракталы и перколяция в пористой среде / Э. Гийон, К. Д. Митеску, Ж.-П. Юлен, С. Ру // *УФН*. – 1991. – Т. 161, № 10. – С. 121-128.

149. *Шредер, М.* Фракталы, хаос, степенные законы / М. Шредер. – М.: Ижевск, 2001. 528 с.

150. *ГОСТ 30515-2013* Цементы. Общие технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 37 с.

151. *ГОСТ 31108-2020* Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

152. *ЕвроХим-И.* Добавки для сухих строительных смесей. Порообразователь ESAPON 1214. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/poroobrazovateli/esapon>.

153. *ЕвроХим-И.* Добавки для сухих строительных смесей. Порообразователь ASCO 93. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL:

<https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/poroobrazovateli/asco-93>.

154. *ТУ 38-00-05807999-33-95* Синтетический углеводородный пенообразователь целевого назначения пенообразователь ПО-6НП. Технические условия. – 1995.

155. *ТУ 2483-003-13420175-2015* Протеиновый пенообразователь «Эталон». Технические условия. – 2015.

156. *ТУ 5745-001-77921756-2006* Гидроизоляционная добавка в бетон «Пенетрон Адмикс». Технические условия. – 2006.

157. *ГОСТ 28177-89* Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия. Официальное издание. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 21 с.

158. *Elocrete*. Пластификаторы для бетона. Полипласт. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://polyplast-un.ru/catalog/stroitelnaya-khimiya/dobavki-dlya-betonov/plastifitsiruyushchie-i-vodoredutsiruyushchie/elocrete/>

159. *Полипласт СП-1*. Пластификаторы для бетона. Полипласт. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://polyplast-un.ru/catalog/stroitelnaya-khimiya/dobavki-dlya-betonov/plastifitsiruyushchie-i-vodoredutsiruyushchie/poliplast_sp_1/

160. *ГОСТ 10832-2009* Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2011. – 19 с.

161. URL: <https://promperlit.ru/products/5/>

162. *ГОСТ Р 58894-2020* Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 18 с.

163. *ГОСТ 23732–2011* Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.

164. *Дубкова, Н. З.* Патент на изобретение № 2413577. Вибрационная шаровая мельница / Н. З. Дубкова, З. К. Галиакберов, Э. Х. Тухбиева, А. Н. Николаев, В. Ф. Шарафутдинов. Оpubл. 10.03.2011. Бюл. № 7. – 6 с.

165. *Лукьянченко, А. Н.* Патент на изобретение № 2048920. Струйно-вихревая мельница / А. Н. Лукьянченко, П. В. Сидоров. Оpubл. 27.11.1995. – 5 с.

166. *Роторно-шаровая мельница «РШМ МИКРОН».* Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://nanomol.ru/>

167. *Меркин, А. П.* Ячеистые бетоны: научные и практические предпосылки дальнейшего развития / А. П. Меркин // Строительные материалы. – 1995. – № 2. – С. 11–15.

168. *СН 277-80.* Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 47 с.

169. *ГОСТ 3594.11-93* Глины формовочные огнеупорные. Метод определения влаги порошкообразных глин. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 6 с.

170. *ГОСТ 310.3-76* Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

171. *ГОСТ 12730.2-2020* Бетоны. Метод определения влажности (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015.

172. *Сулейманова, Л. А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023660735. Программа расчета состава теплоизоляционного пенобетона / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский, М. А. Богачева. Оpubл. 24.05.2023.

173. *ГОСТ 25485-2019* Бетоны ячеистые. Общие технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.

174. *ГОСТ 12852.0-2020* Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний (с Поправками). Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 8 с.

175. *ГОСТ 27005-2014* Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

176. *ГОСТ 10180-2012* Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

177. *ГОСТ 12730.3-2020* Бетоны. Метод определения водопоглощения (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 6 с.

178. *ГОСТ 25898-2020* Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 9 с.

179. *ГОСТ 7076-99* Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Официальное издание. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 22 с.

180. *Погорелова, И. А.* Патент на изобретение №2811671. Способ определения пористости ячеистых бетонов / И. А. Погорелова, К. А. Сулейманов, В. С. Лесовик, И. С. Рябчевский. Оpubл.: 15.01.24.

181. *Бедарев, А. А.* Оптимизация и управление процессами структурообразования ячеистого силикатного бетона на основе мультипараметрической модели: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бедарев Анатолий Андреевич. – Воронеж, 2013. – 250 с.

182. *Рябчевский, И. С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667396. Программа определения параметров пористости ячеистых бетонов / И. С. Рябчевский, Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. А. Богачева. Оpubл. 24.07.2024.

183. *Рябчевский, И. С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667454. Программа определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов / И. С. Рябчевский, Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. А. Богачева. Оpubл. 24.07.2024.

184. *Урханова, Л. А.* Эффективные ячеистые бетоны с использованием отходов теплоэнергетики / Л. А. Урханова, Е. Д. Балханова, В. В. Хахинов // Вестник Бурятского Государственного Университета. – 2012. – № 3. – С. 127–131.

185. *Магдеев, У. Х.* Патент на изобретение № 2342347. Способ приготовления сухого тонкодисперсного пенообразователя и способ приготовления сухой сырьевой смеси для пенобетона с использованием этого пенообразователя / У. Х. Магдеев, В. Г. Хозин, Н. М. Красиникова, Н. Н. Морозова, М. М. Рахимов. Оpubл. 27.12.2008.

186. *Красиникова, Н. М.* Сухие смеси для неавтоклавного пенобетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Красиникова Наталья Михайловна. – Казань, 2010. – 207 с.

187. *Вишторский, Е. М.* Оценка свойств некоторых пенообразователей для пенобетонов неавтоклавного твердения / Е. М. Вишторский // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – № 4-2(132). – С. 121-126.

188. *Ухова, Т. А.* Опыт применения комплексных добавок на основе суперпластификаторов при производстве ячеистых бетонов / Т. А. Ухова, И. Г. Кривицкая // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Тезисы докладов 111 республиканской конференции. – Таллин, 1978. – С. 146-147.

189. *Хеирбеков, Р. А.* Высокоэффективный поризованный арболит на основе шлакосиликатных вяжущих веществ: дис. ... канд. техн. наук: 2.1.5. / Хеирбеков Руслан Азерович. – Москва, 2023. – 133 с.

190. *Черноситова, Е. С.* Теплоизоляционный пенобетон на модифицированных пеноцементных смесях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Черноситова Елена Сергеевна. – Белгород, 2005. – 252 с.

191. *Hu, J.* Local porosity analysis of pore structure in cement paste / J. Hu, P. Stroeve // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 233-242.

192. *Feng, J.* Accelerating multi-point statistics reconstruction method for porous media via deep learning / J. Feng, Q. Teng, X., He X. Wu // *Acta Mater.* – 2018. – Vol. 159. – P. 296-308.

193. *Bostanabad, R.* Characterization and reconstruction of 3D stochastic microstructures via supervised learning / R. Bostanabad, W. Chen, D. Apley // *J. Microsc.* – 2016. – Vol. 264(3). – P. 282-297.

194. *Li, X.* Predicting the effective mechanical property of heterogeneous materials by image based modeling and deep learning / X. Li, Z. Liu, S. Cui, C. Luo, C. Li, Z. Zhuang // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2019. – Vol. 347. – P. 735-753.

195. *Wang, Z.* A rapid quantitation of cell attachment and spreading based on digital image analysis: Application for cell affinity and compatibility assessment of synthetic polymers / Z. Wang, Y. Guo, P. Zhang // *Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 128. – P. 112267.

196. *Pang, C. M.* Void characterization and effect on properties of foam concrete / C. M. Pang, W. Shaohua // *Journal of Building Materials.* – 2017. – Vol. 20. – P. 93-98.

197. *Бавыкин, О. В.* Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности / О. В. Бавыкин, О. Ф. Вячеславова // *Известия МГТУ "МАМИ".* – 2013. – Т. 1, № 1(15). – С. 14-18.

198. *Беликова, В. О.* Фрактальная размерность и аспекты ее применения / В. О. Беликова // *Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвузовский сборник научных трудов / Рязанский государственный радиотехнический университет. Том Выпуск 2.* – Рязань: ИП Коняхин А.В. (BookJet), 2019. – С. 56-58.

199. *Tong, F. G.* An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow / F. G. Tong, L. R. Jing, R. W. Zimmerman // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2009. – Vol. 46(8). – P. 1358-1369.

200. *Corasaniti, S.* Heat conduction in two and three-phase media with solid spherical particles of the same diameter / S. Corasaniti, F. Gori // *Int. J. Therm. Sci.* – 2017. – Vol. 112. – P. 460-469.

201. *Марков, Б. Н.* Вычисление фрактальной размерности поверхности по стандарту ИСО / Б. Н. Марков, Д. А. Мастеренко, В. И. Телешевский // *Наука сегодня: вызовы, перспективы и возможности: Материалы международной научно-практической конференции.* – Вологда: ООО «Маркер», 2019. – Т. 1. – С. 85-87.

202. *Tarnawski, V. R.* Enhancement of the cubic cell soil thermal conductivity model / V.R. Tarnawski, F. Gori // *Int. J. Energy Res.* – 2002. – Vol. 26(2). – P. 143-157.

203. *Chen, W.* Predicting the effective thermal conductivity of porous building materials using improved Menger sponge fractal structure / W. Chen, Y. Wang, D. Wang, Y. Liu, J. Liu // *International Journal of Thermal Sciences.* – 2023. – Vol. 184. – P. 107985.

204. *Wang, Y. Y.* A model for the effective thermal conductivity of moist porous building materials based on fractal theory / Y. Y. Wang, C. Ma, Y. F. Liu // *Int. J. Heat Mass Tran.* – 2018. – Vol. 125. – P. 387-399.

205. *Jiang, J.* Estimating thermal conductivity of lightweight nanoporous cement pastes using a hybrid fractal model / J. Jiang, L. Zheng, M. R. Jones // *Construct. Build. Mater.* – 2022. – Vol. 327. – P. 126941.

206. *Денисов, Г. А.* Производство и использование сухих строительных смесей / Г. А. Денисов // *Строительные материалы XXI века.* – 2011. – № 1. – С. 14-17.

207. *Урханова, Л. А.* Использование вторичного сырья для производства пенобетона / Л. А. Урханова // *Строительные материалы.* – 2008. – № 1. – С. 34-35.

208. *Безбородов, В. А.* Сухие строительные смеси и технология их применения: монография / В. А. Безбородов, Е.В. Парикова, А.П. Пичугин. – Новосибирск: 2010. – 126 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023660735**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660735

**«Программа расчета состава теплоизоляционного
пенобетона»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU),
Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь
Сергеевич (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2023618885**

Дата поступления **04 мая 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 мая 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Патент на изобретение № 2811671

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2811671**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ
ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Погорелова Инна Александровна (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Лесовик Валерий Станиславович (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU)*

Заявка № **2023115880**

Приоритет изобретения **16 июня 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **15 января 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **16 июня 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024667396**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667396

**Программа определения параметров пористости
ячеистых бетонов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна
Александровна (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2024665728**

Дата поступления **09 июля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 июля 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024667454**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667454

**Программа определения фрактальной размерности
пористой структуры ячеистых бетонов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна
Александровна (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2024665680**

Дата поступления **09 июля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 июля 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

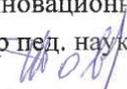
Ю.С. Зубов

**Титульный лист стандарта организации
«Сухие пенобетонные смеси. Технические условия»**

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

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р пед. наук, профессор

Т.М. Давыденко
«06» 06 2024 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор
С.Н. Глаголев
«06» 06 2024 г.



СУХИЕ ПЕНОБЕТОННЫЕ СМЕСИ

**Технические условия
СТО 02066339-077-2024**

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
д-р техн. наук, проф.

Л.А. Сулейманова
«03» 06 2024 г.

Исполнитель:

аспирант

И.С. Рябчевский
«03» 06 2024 г.

Белгород 2024 г.

Титульный лист рекомендаций по производству сухих пенобетонных смесей

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. Г. ШУХОВА**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р тех. наук, профессор

Т.М. Давыденко
Т.М. Давыденко

«06» 06 2024 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по производству сухих пенобетонных смесей

РАЗРАБОТАНО

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф.

Л.А. Сулейманова
Л.А. Сулейманова

«03» 06 2024 г.

Исполнитель:

аспирант

И.С. Рябчевский
И.С. Рябчевский

«03» 06 2024 г.

Белгород 2024 г.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Общество с ограниченной ответственностью «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»
ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Юр. Адрес: 308013, Белгородская обл., г. Белгород, Михайловское шоссе, дом 5
Почтовый адрес: 308501, Белгородская обл., Белгородский р-н,
п. Дубовое, ул. Заводская, д. 4Д
ИНН 3123319466 КПП 312301001 ОГРН 1133123004618 ОКПО 10410443
р/с 40702810207000005679 БИК 041403633 к/с 30101810100000000633
ОТДЕЛЕНИЕ №8592 СБЕРБАНКА РОССИИ Г.БЕЛГОРОД
т. (4722) 57-57-49; 57-57-61

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

И.Н. Соклакова

11.07.2024г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Рябчевского Игоря Сергеевича**

на тему: «Теплоизоляционные пенобетоны на основе сухих смесей»

Комиссия в составе:

представители ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

начальник строительной лаборатории Агаркова Ю.С.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. каф. СиГХ, д-р техн. наук, проф. Сулейманова Л.А.,

доц. каф. СиГХ, канд. техн. наук, доц. Погорелова И.А.,

аспирант Рябчевский И.С.

составили настоящий акт о том, что результаты научной работы использованы при производстве сухой пенобетонной смеси для изготовления пенобетона марки по средней плотности D200. В состав сухой пенобетонной смеси входили следующие сырьевые компоненты:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Белгородский цементный завод»;
- пенообразователь ПО-6НП;
- бентонитовая глина компании ТОО «ТАГБЕНТ»;
- суперпластификатор Elocrete;
- вспученный перлитовый песок ВПМ, М75 производства ООО «Промперлит»;
- микрокремнезем конденсированный МК-85 производства ООО «Химпром».

Выпущенная опытная партия сухой пенобетонной смеси была использована при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Лесная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. На указанном объекте проведена теплоизоляция полов.

Начальник строительной лаборатории

д-р техн. наук, проф.

канд. техн. наук, доц.

аспирант

Ю.С. Агаркова

Л.А. Сулейманова

И.А. Погорелова

И.С. Рябчевский

Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор цифровой трансформации
и образовательной деятельности

БФТУ им. В.Г. Шухова

канд. техн. наук, доцент

В.М. Поляков

«04» 03 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы И.С. Рябчевского «Теплоизоляционные пенобетоны на основе сухих смесей», используются в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 08.03.01, 08.04.01 Строительство, что отражено в рабочих программах дисциплин «Современные материалы и инновационные технологии при реконструкции и технической эксплуатации объектов жилищно-коммунального хозяйства и городской инфраструктуры», «Современные технологии в строительстве», «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии при реконструкции и эксплуатации объектов городской застройки».

Зав. кафедрой строительства
и городского хозяйства,
д-р техн. наук, профессор

Л.А. Сулейманова

Директор Инженерно-строительного
института, д-р техн. наук, профессор

В.А. Уваров