

На правах рукописи



РЯБЧЕВСКИЙ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЕНОБЕТОНЫ
НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Сулейманова Людмила Александровна
Официальные оппоненты	Логанина Валентина Ивановна , доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующий кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства» Павленко Наталья Викторовна кандидат технических наук, доцент ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», старший научный сотрудник
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится «01» июля 2025 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Ryabchevskiy

Автореферат разослан «05» мая 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 экологических 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 предварительной 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 (эттрингит, 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 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.

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 (K1). 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В условиях перехода к ресурсоэффективным технологиям пенобетон, сочетающий низкую плотность и высокую теплоизоляцию, сохраняет роль ключевого материала для строительства, особенно для северных регионов. И одним из перспективных направлений его дальнейшего развития является разработка эффективных теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей.

В связи с этим *рабочей гипотезой исследования* стало предположение о том, что повышение физико-механических характеристик теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей возможно за счет механизма комплексного воздействия минеральных добавок (микрокремнезем и вспученный перлитовый песок) и пенообразующих компонентов, а также развития систем контроля и оценки качества макропористой структуры полученных пенобетонов, в том числе с применением методов фрактального анализа.

Для подбора и получения рациональных составов теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей использовались следующие сырьевые компоненты: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (АО «Белгородский цементный завод»); минеральные добавки: вспученный перлитовый песок ВПМ, М75 (ООО «Промперлит») (далее – перлит), микрокремнезем конденсированный МК-85 (ООО «Химпром»); сухие порообразователи – Esaron 1214 и ASCO 93 (АО «ЕвроХим»); жидкие пенообразователи: синтетический пенообразователь ПО-6НП (ООО «НЗСП») и протеиновый пенообразователь Эталон (ООО «Аист»); в качестве водопоглощающей добавки для перевода жидких пенообразователей в сухое состояние использовалась добавка «Пенетрон Адмикс» (ООО «Завод гидроизоляционных материалов «Пенетрон»); в качестве стабилизатора пены применялись бентонитовые глины производства ООО «Бентонит Хакасии» (Бентонит 1) и ТОО «ТАГБЕНТ» (Бентонит 2); суперпластификаторы: Elocrete и Полипласт СП-1 (далее – СП-1) (ООО «Полипласт-Юг»).

На первом этапе проведены исследования кратности и стабильности пен из сухих пено- и порообразователей, результаты которых представлены на рис. 1. Перевод жидких пенообразователей в сухое состояние осуществлялся гидратационным методом, заключающийся в смешивании жидкого концентрата пенообразователя с водопоглощающей добавкой в соотношении 1 : 2 и выдержке 3–7 часов для завершения реакции дегидратации пенообразователя.

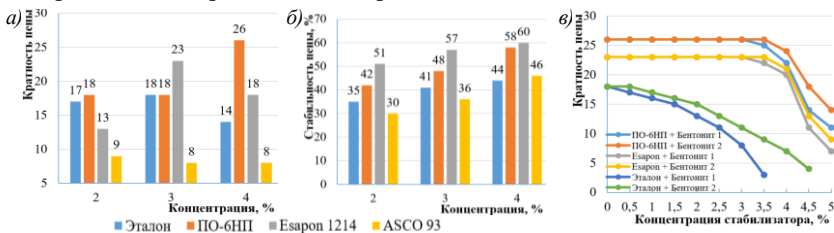


Рисунок 1 – Зависимости кратности (а) и стабильности (б) пены от концентрации пенообразователя и кратности пены (в) от концентрации стабилизатора

Экспериментальная оценка пено- и порообразователей выявила, что синтетический пенообразователь ПО-6НП обеспечивает максимальную кратность пены (рис. 1, а) с высокой стабильностью (рис. 1, б). Для повышения технических характеристик пенообразователей исследовано влияние бентонитовых глин на кратность пен (рис. 1, в). Установлено, что применение бентонитовых глин в комбинации с белковыми пенообразователями демонстрирует сниженную эффективность,

что связано с высокой ионообменной способностью бентонита, способствующей частичной денатурации белков и десорбции их с межфазной границы. Бентонит 2 в дозировке до 3 мас. % подтвердил свою эффективность как стабилизатор пены при совокупном применении с ПО-6НП.

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности повышения физико-механических характеристик и обоснования практического применения теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей исследованы закономерности влияния сырьевых компонентов и технологических параметров на физико-механические характеристики.

Введение минеральных добавок (перлит, микрокремнезем) в цементные системы позволяет целенаправленно регулировать их физико-механические характеристики. Перлит снижает плотность пропорционально доле (до 8 % при 10 %), но свыше 10 % резко ухудшает прочность из-за избыточной пористости. Микрокремнезем до 10 % повышает прочность на 15 % за счет уплотнения матрицы, однако введение более 10 % вызывает агрегацию частиц и снижение прочности.

С целью повышения реакционной способности сырьевых компонентов теплоизоляционных пенобетонов изучено влияние режимов их механоактивации на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора. Предварительно изучено влияние типа помольного оборудования (вибрационная мельница МВ-20, вихревая струйная мельница ВСМ-01, роторно-шаровая мельница РШМ-МИК-РОН) на удельную поверхность компонентов (цемент (90 %) + перлит (5 %) + микрокремнезем (5 %) + Elocrete (0,5 % от Ц)) при 15-минутном измельчении. Установлена корреляция между удельной поверхностью, продолжительностью помола компонентов и прочностными характеристиками смеси помола (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты удельной поверхности, времени помола и прочностные характеристики смеси помола в различных мельницах

Вид мельницы	При фиксированной продолжительности помола		При фиксированной удельной поверхности		Прочность на сжатие при $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$, МПа	
	$S_{уд}, \text{ м}^2/\text{кг}$	Продолжительность помола, мин	$S_{уд}, \text{ м}^2/\text{кг}$	Продолжительность помола, мин	3 сут.	28 сут.
Вибрационная	612	15	700	19	56,0	73,1
Вихревая струйная	404	15	700	26	57,3	78,5
Роторно-шаровая	751	15	700	14	60,5	85,5

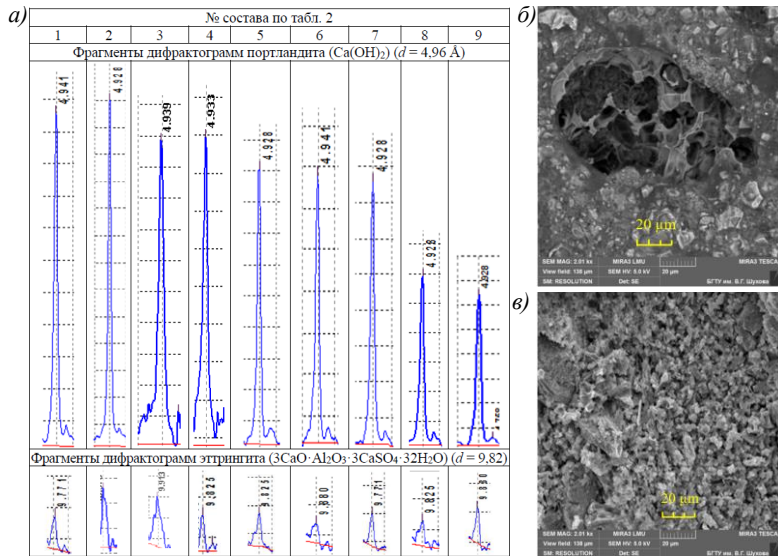
Максимальные значения прочности достигнуты при использовании роторно-шаровой мельницы, обеспечившей рациональное соотношение удельной поверхности и продолжительности помола. По совокупности факторов проведено ранжирование помольных агрегатов по степени повышения эффективности их использования: вибрационная мельница → вихревая струйная мельница → роторно-шаровая мельница.

Изучено влияние состава композиций, содержащих минеральные добавки (перлит и микрокремнезем) и суперпластификаторы (Elocrete и СП-1) на кинетику помола в роторно-шаровой мельнице, а также показатели нормальной густоты (НГ), сроки схватывания и прочностные характеристики цементного теста и камня (табл. 2). Прирост прочности в исследуемых композициях обусловлен синергией факторов: снижением водоцементного отношения благодаря суперпластификаторам и уплотнением структуры за счет диспергирования частиц и заполнения пор, формируемых перлитом, микрокремнеземом. Наибольшую эффективность продемонстрировали системы с Elocrete, где пластифицирующий эффект и структурные модификации обеспечивают рост как ранней, так и долговременной прочности.

Таблица 2 – Свойства цементного теста и камня в зависимости от состава

№ состава	Состав композиции	$S_{уд}$, м ³ /кг	Продолжительность по- мола, мин	НГ, %	Сроки схватывания, мин		Прочность на сжатие, МПа			
					начало	конец	3 сут	Прирост, %	28 сут	Прирост, %
1	Цемент	724	15	26,4	120	230	-	68,4	-	-
2	Цемент + СП-1	718	15	23,2	75	160	4,8	71,9	5,1	4,8
3	Цемент + Elocrete	694	15	22,4	45	160	9,6	75,2	9,9	9,6
4	Цемент + СП-1 + Перлит	718	10	24,2	75	160	5,6	72,4	5,8	5,6
5	Цемент + Elocrete + Перлит	694	5	23,8	45	160	11,3	76,3	11,6	11,3
6	Цемент + СП-1 + Микрокремнезем	698	15	24,5	85	205	13,2	77,4	13,3	13,2
7	Цемент + Elocrete + Микрокремнезем	718	15	23,3	55	170	15,9	79,1	15,8	15,9
8	Цемент + СП-1 + Перлит + Микрокремнезем	713	20	25,1	100	235	18,8	83,1	18,6	18,8
9	Цемент + Elocrete + Перлит + Микрокремнезем	691	15	24,2	65	175	19,5	85,0	19,3	19,5

Исследования структурообразования цементного камня выявили значительные изменения межплоскостных расстояний портландита и этtringита, что отражает влияние добавок на процессы гидратации (рис. 2).

**Рисунок 2** – Фазовый состав и структурные особенности исследуемых композиций:

a – данные РФА; *б* – микроструктура цементного камня с перлитом (образец 5);
в – микроструктура цементного камня с микрокремнеземом (образец 7)

Определены механизмы влияния минеральных добавок на микроструктуру цементного камня: перлит формирует механически закреплённую систему за счет проникновения гидратных новообразований в его поры (рис. 2, *б*), исключая дефекты расслоения; микрокремнезем индуцирует образование низкоосновного С-S-N геля повышенной плотности, снижая содержание портландита (рис. 2, *в*). Взаимодействие компонентов (цемент + перлит + микрокремнезем) создает полифазную систему (этtringит, С-S-N гель), что комплексно повышает прочность цементного камня.

Для рационализации состава теплоизоляционных пенобетонов использован метод математического планирования эксперимента с варьированием факторов: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,3 до 0,5 с интервалом варьирования 0,1; расход перлита, % от массы цемента (X_2) в пределах от 0 до 10 с интервалом варьирования 5; расход микрокремнезема, % от массы цемента (X_3) в пределах от 0 до 10 с интервалом варьирования 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.

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами и основными факторами, проводили статистическую обработку экспериментальных данных. Получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих факторов на свойства пенобетонов (1, 2):

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

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

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие пенобетона. Комплексное представление о влиянии водотвердого отношения (В/Т), расхода перлита и микрокремнезема на выходные параметры теплоизоляционного пенобетона отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей (рис. 3 и 4).

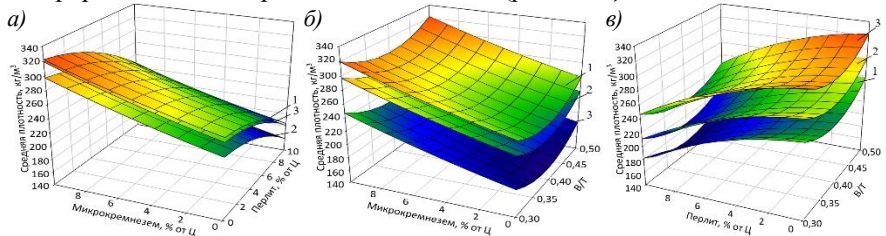


Рисунок 3 – Номограммы зависимостей средней плотности пенобетона: а – от В/Т: 1 – 0,3; 2 – 0,4; 3 – 0,5; б – от расхода перлита: 1 – 0 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %; в – от расхода микрокремнезема: 1 – 0 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %

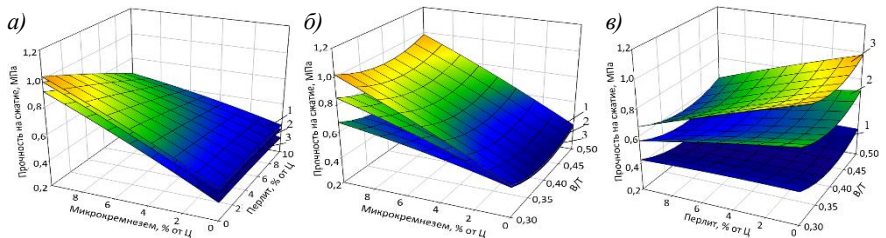


Рисунок 4 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие пенобетона: а – от В/Т: 1 – 0,3; 2 – 0,4; 3 – 0,5; б – от расхода перлита: 1 – 0 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %; в – от расхода микрокремнезема: 1 – 0 %; 2 – 5 %; 3 – 10 %

Для анализа влияния технологических параметров на характеристики пенобетонов также применен метод математического планирования эксперимента. Варьируемые факторы включали: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,3

до 0,5 с интервалом варьирования 0,1; расход пенообразующего компонента (ПО-6НП : Бентонит 2 = 1 : 1), % от массы цемента (X_2) в пределах от 2 до 6 с интервалом варьирования 2; удельная поверхность сырьевых компонентов, $\text{м}^2/\text{кг}$ (X_3) в пределах от 550 до 850 с интервалом варьирования 150.

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

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами, такими как средняя плотность и прочность на сжатие теплоизоляционного пенобетона, и основными факторами, проводили статистическую обработку экспериментальных данных. Получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих факторов на свойства пенобетона (3, 4):

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

$$R_{сжс} = 0,48 - 0,02 \cdot X_1 - 0,08 \cdot X_2 + 0,12 \cdot X_3 + 0,13 \cdot X_1^2 + 0,13 \cdot X_2^2 - 0,01 \cdot X_3^2 - 0,04 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,04 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4)$$

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие теплоизоляционных пенобетона. Комплексное представление о влиянии В/Т, расхода пенообразующей добавки и удельной поверхности сырьевых компонентов на выходные параметры отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей (рис. 5 и 6).

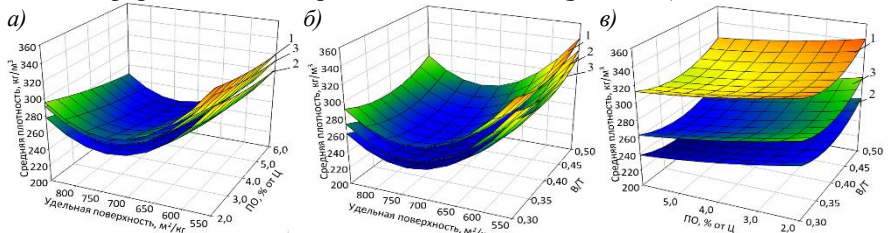


Рисунок 5 – Номограммы зависимостей средней плотности пенобетона: *а* – от В/Т: 1 – 0,3; 2 – 0,4; 3 – 0,5; *б* – от расхода пенообразующей добавки: 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %; *в* – от удельной поверхности сырьевых компонентов: 1 – 550 $\text{м}^2/\text{кг}$; 2 – 700 $\text{м}^2/\text{кг}$; 3 – 850 $\text{м}^2/\text{кг}$

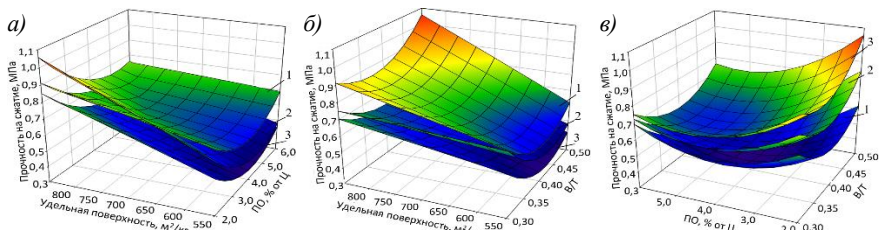


Рисунок 6 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие пенобетона: *а* – от В/Т: 1 – 0,3; 2 – 0,4; 3 – 0,5; *б* – от расхода пенообразующей добавки: 1 – 2 %; 2 – 4 %; 3 – 6 %; *в* – от удельной поверхности сырьевых компонентов: 1 – 550 $\text{м}^2/\text{кг}$; 2 – 700 $\text{м}^2/\text{кг}$; 3 – 850 $\text{м}^2/\text{кг}$

Рационализация состава теплоизоляционных пенобетона, выполненная на основе экспериментально-статистических моделей влияния рецептурных факторов на физико-механические характеристики, позволила определить рациональное соотношение компонентов сухих смесей, обеспечивающие высокие физико-механические характеристики пенобетона. По результатам исследований разработаны

составы теплоизоляционных пенобетонов на основе сухих смесей и изучены изменения физико-механических характеристик в зависимости от процентного содержания сырьевых компонентов и условий их механоактивации. Разработанные составы и результаты комплексного анализа физико-механических свойств теплоизоляционных пенобетонов в сравнении с товарным составом сухой смеси для теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности $D400$ (производства ООО «Совби») систематизированы в табл. 3.

Таблица 3 – Составы сухих пенобетонных смесей и физико-механические характеристики пенобетонов на их основе

№ п/п	Цемент, %	Перлит, %	Микрокремнезем, %	Пенообразователь, % от Ц	Бентонит, % от Ц	Еlastete, % от Ц	Рекоменд. В/Т	Удельная поверхность, m^2/kg	Средняя плотность, ρ_p , kg/m^3	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие, R_p , МПа	Коэффициент теплопроводности, $Bt/(m \cdot K)$	Коэффициент паропроницаемости, $mg/(m \cdot ч \cdot Pa)$	Усадка, mm/m
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
Пенобетоны на разработанных составах														
2	85	10	5	3	3	0,2	0,4	700	202	$D200$	0,50	0,061	0,23	0,54
3	85	5	10	2	2	0,2	0,4	700	269	$D250$	0,71	0,066	0,20	0,45
4	85	5	10	1	1	0,2	0,5	850	296	$D300$	1,13	0,070	0,18	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.

Микроструктурный анализ (рис. 7) выявил, что микрокремнезем уплотняет межпоровые перегородки за счет микрозаполнения (1–5 мкм), повышая прочность, а перлит формирует иерархическую систему мезопор (20–300 мкм), снижая плотность. Совместное введение добавок минимизирует дефекты (трещины, сквозные поры) и модифицирует морфологию гидратных фаз. Управление размером пор, плотностью перегородок и фазовым составом матрицы позволяет проектировать материалы с заданным соотношением прочности и теплоизоляционных свойств.

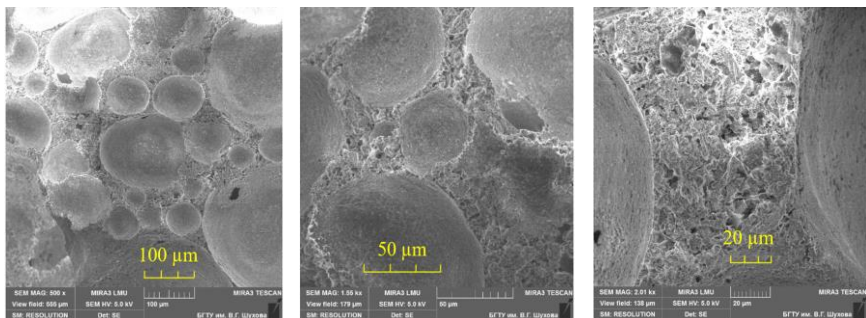


Рисунок 7 – Микроструктура образца пенобетона марки по средней плотности $D200$

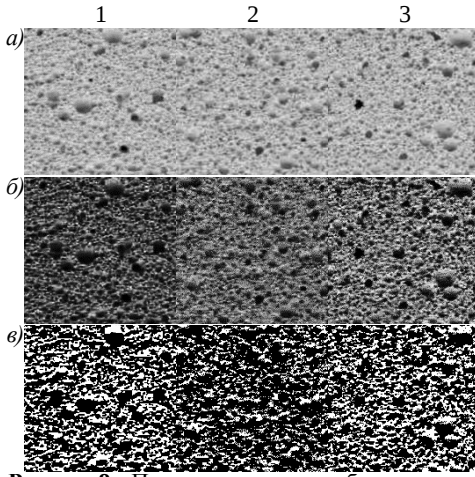


Рисунок 8 – Поверхность разреза образцов пенобетона марки по средней плотности $D200$:
a – натуральный вид; *б* – поверхность разреза с порами, заполненными аморфным углеродом;
в – бинаризованное изображение; 1-3 – номера образцов

тов поверхности теплоизоляционных пенобетонов марок по средней плотности $D200$ – $D300$ размером 15×15 мм каждый. Показатель поверхностной пористости пенобетонов определяется процентным содержанием пикселей сформированного цифрового изображения, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету. К пикселям с RGB от 0 до 100 относятся пиксели пор, заполненных измельченным аморфным углеродом; от 100 до 200 – пиксели фактических границ пор, полученные при последовательном освещении поверхности пенобетона световыми лучами; от 200 до 255 – пиксели межпоровых перегородок. Для сравнения результатов в исследовании использовались данные, полученные с использованием программы ImageJ, а также результаты натурных исследований пористости образцов пенобетонов. Результаты анализа изображений представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты анализа цифровых изображений поверхности разреза образцов пенобетонов

№ образца	Пористость, %		
	полученная разработанным способом	полученная с использованием программы ImageJ	полученная натурными исследованиями
Марка по средней плотности $D200$			
1	88,88	87,93	89,12
2	88,57	89,77	88,94
3	86,59	84,18	86,01
Марка по средней плотности $D250$			
4	84,35	83,85	84,85
5	84,22	83,45	84,95
6	83,75	82,90	84,25
Марка по средней плотности $D300$			
7	81,34	80,78	81,45
8	82,26	80,96	81,86
9	80,10	78,88	80,53

Структура пенобетонов, определяемая распределением пор по размерам, форме и пространственной ориентации, оказывает ключевое влияние на их физико-механические свойства. В связи с этим разработан способ определения пористости ячеистых бетонов, основанный на методе анализа изображений пористой структуры (рис. 8, *a*) с использованием аморфного углерода в качестве заполнителя пор (рис. 8, *б*), дальнейшей бинаризации изображения (рис. 8, *в*) и последовательного сравнения интенсивности каждой из трех цветовых компонент: красной, зеленой и синей, для каждого пикселя изображения.

Для проведения исследования использовались наборы фрагментов

На основании результатов исследования, приведенных в табл. 4, можно сделать вывод о высокой сходимости значений пористости, полученных при помощи разработанного метода и результатов натурных исследований, при этом относительное допустимое расхождение между результатами не превышает 1 %.

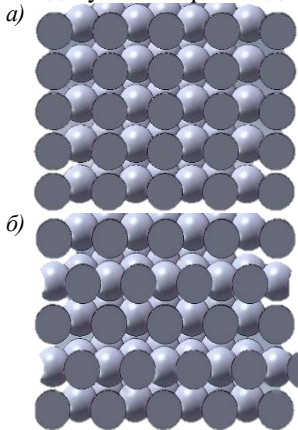


Рисунок 9 – Характер монодисперсной упаковки пор: *a* – кубическая упаковка пор; *б* – гексагональная упаковка пор

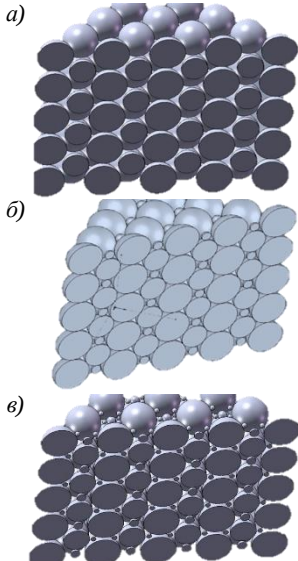


Рисунок 10 – Характер гетеродисперсной упаковки пор: *a* – бинарная упаковка пор; *б* – тернарная упаковка пор; *в* – кватернарная упаковка пор

Для количественной оценки качества пористой структуры пенобетонов применен метод фрактального анализа, где введен показатель фрактальной размерности D , характеризующий степень заполнения объема порами. Значение $D = 1$ соответствует отсутствию пор, $D = 2$ – полному заполнению площади порами. Экспериментально изучены системы моно- (рис. 9, *a, б*) и гетеродисперсной (рис. 10, *a–в*) упаковки пор, что позволило выявить закономерности их пространственного распределения в зависимости от дисперсности и плотности композита.

Измерение фрактальной размерности характера упаковки пор производится следующим способом. Суммарный линейный размер R нескольких пор (например, сумма их поперечных размеров) связан с масштабом измерения a формулой Мандельброта-Ричардсона: $R \sim a^{1-D}$. 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 :

$$K \sim a^{-2(D-1)} \quad (5)$$

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 (6):

$$K = M_0 + M/2 - 1. \quad (6)$$

Для выявления дисперсии среднего значения фрактальной размерности используется следующая методика. По семи измеренным точкам находим значения показателя $h = 2(D-1)$, вычисленных по формуле (7):

$$h = (\ln(K_{n+1}) - \ln(K_n)) / (\ln(a_{n+1}) - \ln(a_n)). \quad (7)$$

Отсюда следует, что фрактальная размерность кубической упаковки пор одного диаметра: кубической $D_a = 1,74$; гексагональной упаковки $D_б = 1,82$; фрактальная размерность бинарной упаковки пор с

бимодальным распределением диаметров $D_0 = 1,88$; фрактальная размерность тернарной иерархической упаковки пор трех различных диаметров $D_0 = 1,95$; фрактальная размерность кватернарной иерархической упаковки пор четырех различных диаметров $D_0 = 1,98$.

Прогрессирующее увеличение фрактальной размерности в полидисперсных системах коррелирует с уменьшением лакунарности, однако даже полидисперсные иерархические упаковки не достигают евклидовой размерности, что подтверждает устойчивость иерархических паттернов, обеспечивающих баланс между плотностью упаковки и фрактальными свойствами.

С использованием авторских программ определения параметров пористости и фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов установлены корреляции между параметрами пористой структуры теплоизоляционных пенобетонов: распределением пор по размерам, их морфологией и пространственной организацией (табл. 5) и фрактальной размерностью (рис. 11).

Таблица 5 – Результаты анализа изображений поверхности образцов пенобетона

№ п/п	Марка по средней плотности	Пористость, %	Средний диаметр пор, мм	Коэффициент формы пор	Площадь поверхности сечения пор, мм ²
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

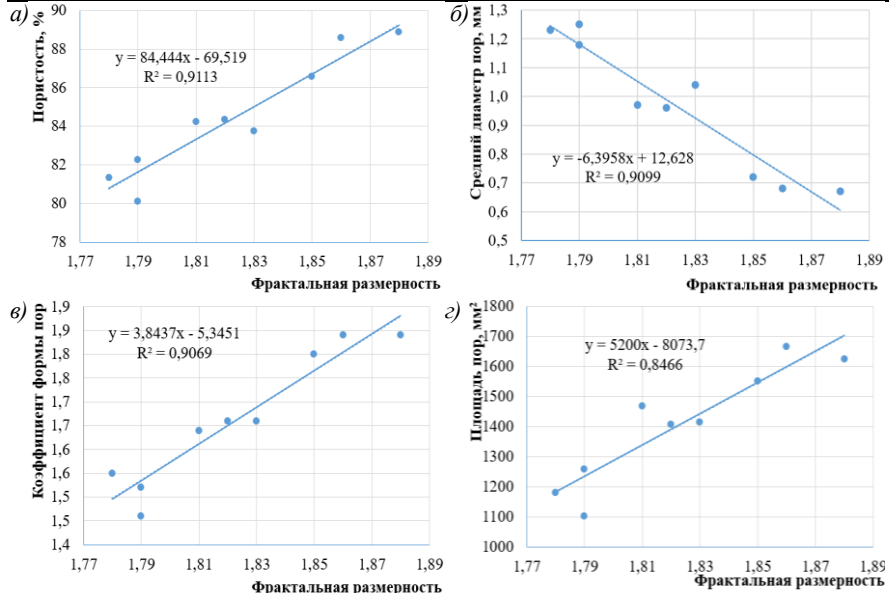


Рисунок 11 – Зависимости фрактальной размерности от основных характеристик пористой структуры ячеистого бетона: а – от пористости; б – от среднего диаметра пор; в – от коэффициента формы пор; г – от площади поверхности сечения пор

Установлено, что рост фрактальной размерности связан с увеличением доли мелких пор пенобетонов и усложнением их пространственного распределения. При равной пористости теплоизоляционных пенобетонов увеличение среднего размера пор снижает их количество и увеличивает толщину межпоровых перегородок. Обратная зависимость фрактальной размерности от площади поверхности сечений пор свидетельствует о меньшей шероховатости и преобладании крупнопористой структуры при высоких значениях фрактальной размерности. Таким образом, увеличение расхода перлита в составе теплоизоляционных пенобетонов способствует повышению лакуарности гетеродисперсной упаковки пор за счет формирования иерархической системы мезопор в структуре материала.

Предложены технологическая схема производства сухих пенобетонных смесей, основанная на совместном помоле компонентов в роторно-шаровой мельнице, и 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.

Разработаны стандарт организации (СТО 02066339-077-2024) и рекомендации по производству сухих пенобетонных смесей. Обоснована технико-экономическая эффективность модификации сухих смесей для теплоизоляционных пенобетонов за счет введения минеральных добавок.

Результаты исследований апробированы при строительстве индивидуального жилого дома по на предприятии ООО «СТРОИТЕХНОЛОГИЯ», где было проведено обустройство оснований под полы с использованием разработанной сухой пенобетонной смеси.

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 предварительной 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.

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 пенобетонных 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 рационализации составов сухих пенобетонных смесей за счет внедрения альтернативных минеральных добавок, включая отходы промышленного производства для снижения себестоимости и повышения экологичности материала, а также совершенствования систем контроля и оценки качества пористой структуры на основе фрактальной геометрии, в том числе моделирования кубических структур, для прогнозирования взаимосвязи между организацией пор, прочностью и теплофизическими свойствами.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Сулейманова, Л.А. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона / Л.А. Сулейманова, **И.С. Рябчевский**, И.А. Погорелова, М.А. Богачева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 8-15. (К1)
2. Сулейманов, К.А. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона / К.А. Сулейманов, В.С. Лесовик, И.А. Погорелова, **И.С. Рябчевский** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 3. – С. 8-16. (К1)

В изданиях, включенных в базу РИНЦ

3. **Рябчевский, И.С.** Анализ мирового рынка сухих строительных смесей / И.С. Рябчевский // V Международный студенческий строительный форум - 2020: сб. докл. В 2-х томах. Том 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 234-238.
4. **Рябчевский, И.С.** Ячеистый бетон на основе сухих строительных смесей / И.С. Рябчевский, А.Р. Анисько // V Международный студенческий строительный форум - 2020: сб. докл. В 2-х томах. Том 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 246-249.
5. Сулейманова, Л.А. Особенности изготовления пенобетона на основе сухих строительных смесей / Л.А. Сулейманова, **И.С. Рябчевский**, Т.А. Ксаби // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. V Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Том 2. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 209-212.
6. Сулейманов, К.А. К вопросу использования бентонитовой суспензии в пористых гипсовых смесях / К.А. Сулейманов, И.А. Погорелова, П.А. Амелин, **И.С. Рябчевский** // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. Том 2. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 170-178.
7. **Рябчевский, И.С.** Особенности формирования пористой структуры ячеистого бетона / И.С. Рябчевский, К.А. Сулейманов, И.А. Чесноков // Университетская наука. – 2022. – № 1(13). – С. 81-83.
8. **Рябчевский, И.С.** Производство сухих ячеистобетонных смесей / И.С. Рябчевский, Т.А. Ксаби // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: сб. докл. Национальной конференции с международным участием. Том Часть 6. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 310-316.
9. **Рябчевский, И.С.** Анализ методов определения пористой структуры ячеистых бетонов / И.С. Рябчевский, М.А. Богачева, К.А. Сулейманов // VIII Международный студенческий строительный форум – 2023: сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т.2. – С. 225-230.
10. Сулейманова, Л.А. Фрактальная размерность упаковки пор ячеистого бетона / Л.А. Сулейманова, **И.С. Рябчевский** // Научные технологии и инновации (XXV научные чтения): сб. докл. Международной научно-практической конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 219-223.

11. Сулейманова, Л.А. Фрактальная размерность формы пор ячеистого бетона / Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский // Университетская наука. – 2023. – № 2(16). – С. 68-70.

12. **Рябчевский, И.С.** Исследование пористости ячеистых бетонов методом анализа изображений / И.С. Рябчевский // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: сб. докл. – Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2024. – С. 593-597.

13. Сулейманов, К.А. Анализ методов определения макропористости ячеистых бетонов / К.А. Сулейманов, И.С. Рябчевский, М.А. Богачева // Инженерное дело на Дальнем Востоке России: сб. докл. IX Всероссийской научно-практической конференции. – Владивосток: Изд-во ВУЦ ДВФУ, 2024. – С. 289-293.

14. Сулейманова, Л.А. Исследование фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов на основе губки Менгера / Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: сб. докл. XXII Международной научно-технической конференции. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2024. – С. 128-133.

15. Сулейманова, Л.А. Особенности исследования пористой структуры ячеистых бетонов методом анализа изображений / Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 373-379.

16. Сулейманова, Л.А. Особенности анализа локальной пористости в ячеистом бетоне / Л.А. Сулейманова, И.С. Рябчевский // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. докл. VIII международной научно-технической конференции. – Алчевск: ДонГТУ, 2024. – С. 391-393.

Объекты интеллектуальной собственности

17. **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. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 24.05.2023.

18. **Пат. RU 2811671.** Способ определения пористости ячеистых бетонов // И.А. Погорелова, К.А. Сулейманов, В.С. Лесовик, И.С. Рябчевский. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». Оpubл. 15.01.2024.

19. **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. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 24.07.2024.

20. 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. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 24.07.2024.

РЯБЧЕВСКИЙ ИГОРЬ СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЕНОБЕТОНЫ
НА ОСНОВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.04.2025.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,15. Тираж 100 экз. Заказ № 53.

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46