

На правах рукописи



БОГАЧЕВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ
ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

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 – 2026

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

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Погорелова Инна Александровна

Официальные оппоненты

Иноземцев Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», доцент кафедры
строительного материаловедения

Попов Александр Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Северо-Восточный
федеральный университет имени
М.К. Аммосова», заведующий кафедрой
«Прикладная механика и строительное
материаловедение»

Ведущая организация

ФГБУ «Научно-исследовательский
институт строительной физики
Российской академии архитектуры
и строительных наук», г. Москва

Защита состоится «11» декабря 2026 года в 10⁰⁰ 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://www.bstu.ru/struct/gna/bogacheva/1790>

Автореферат разослан «16» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В условиях глобальной тенденции к снижению энерго- и ресурсопотребления в строительстве наблюдается рост спроса на материалы, сочетающие экологичность, низкую плотность и высокие теплоизоляционные характеристики. К числу таких перспективных материалов относится дисперсно-армированный пенобетон марки по средней плотности $D300$ и ниже, выпускаемый в виде готовых изделий. Реализация потенциала теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона, способного обеспечить существенное сокращение материало- и энергозатрат на всех стадиях жизненного цикла зданий, сдерживается необходимостью поиска баланса между ключевыми показателями качества, такими как низкая плотность и теплопроводность при требуемом уровне прочности.

Повышение эксплуатационной эффективности теплоизоляционных пенобетонов достигается посредством дисперсного армирования полипропиленовой фиброй, которая не только способствует улучшению физико-механических свойств материала, но и обеспечивает стабилизацию пористой структуры за счет снижения коалесценции пузырьков пены на стадии формирования смеси. Исследование данного технологического подхода 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 пористой структуры материалов, что способствует созданию нового поколения дисперсно-армированных 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 № 19748ГУ/2025, и по программе «Студенческий Стартап», проект № 4133ГССС27/116304; 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 подбора пенообразующих компонентов смеси и условий формирования пористой структуры материала. Вместе с тем установлено, что дисперсное армирование пенобетонных смесей фиброй повышает агрегативную устойчивость поризованной структуры в начальный период структурообразования и улучшает их физико-механические свойства. Однако малоизученными, но актуальными в настоящее время остаются: закономерности влияния геометрических параметров и дозировки фибры на процессы коалесценции пузырьков пены и формирование однородной макро- и микропористой структуры теплоизоляционного пенобетона; взаимосвязь характеристик сырьевых компонентов смеси и дисперсного армирования с прочностными и теплофизическими показателями пенобетона марки по средней плотности $D300$ и ниже и изделий на его основе с использованием системы контроля и оценки качества их пористой структуры, включая применение методов фрактального анализа.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение эффективного теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона с улучшенными физико-механическими характеристиками с системой контроля и оценки качества пористой структуры.

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

- исследование принципов управления процессами формирования пористой структуры теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения с учетом введения в его состав дисперсного армирования полипропиленовой фиброй;
- оценка влияния удельной поверхности цемента и его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой и ускорителем твердения на свойства растворной смеси, затвердевшего раствора как компонентов теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения;
- подбор протеинового пенообразователя и изучение его свойств с учетом комплексной модификации цемента;
- разработка составов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения с учетом рецептурно-технологических факторов и изучение его физико-механических характеристик;
- разработка системы контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения, включая исследование корреляции фрактальной размерности пористой структуры материала с его физико-механическими характеристиками;
- подготовка нормативной документации на производство и применение теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона; апробация результатов исследований в производственных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона за счет применения цемента с удельной поверхностью до $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой и сульфатом алюминия в качестве ускорителя твердения и стабилизатора пены протеинового пенообразователя, полипропиленовой фибры с установленными геометрическими параметрами волокна. Данное решение обеспечивает формирование однородной пористой структуры теплоизоляционного пенобетона с обеспечением марки по средней плотности $D150-D300$.

Установлены закономерности влияния геометрических параметров полипропиленовой фибры на процесс коалесценции пузырьков пены при формировании пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона. Показано, что увеличение длины полипропиленового волокна с 6 до 12 мм снижает рост плотности пены во времени и уменьшает средний диаметр пор затвердевшего пенобетона. Выявлен синергетический эффект дисперсного армирования пенобетона полипропиленовой фиброй с длиной волокон 6 и 12 мм при их соотношении 30:70, превышающий результат суммирования эффектов отдельных компонентов дисперсного армирования на 39 %.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования теплоизоляционного пенобетона на основе механизма снижения коалесценции пузырьков пены за счет оптимизации концентрации твердой фазы и дисперсного армирования.

Разработаны экспериментально-статистические модели, определяющие влияние водотвердого отношения, удельной поверхности цемента и расхода полипропиленовой фибры на среднюю плотность и прочность на сжатие теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения цемента с удельной поверхностью до $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой Elocrete и сульфатом алюминия в качестве как ускорителя твердения в количестве 1 % с образованием высокодисперсного аморфного гидроксида алюминия в цементной системе, так и стабилизатора протеинового пенообразователя «Foam X», а также полипропиленовой фибры с длиной волокон 6 и 12 мм при их соотношении 30:70 для дисперсного армирования теплоизоляционного пенобетона. Получены рациональные составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности $D150\text{--}D300$, обеспечивающих класс по прочности на сжатие $B0,35\text{--}B1$ при коэффициенте теплопроводности $0,055\text{--}0,065 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Разработана система контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов, основанная на определении ее фрактальной размерности путем последовательного изменения разрешения изображения поверхности пенобетона. Установлена корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности пористой структуры материала и его физико-механическими показателями.

Предложена технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе, особенностью которой является помол цемента в роторно-шаровой мельнице и введение полипропиленовой фибры в состав пенобетонной смеси совместно с обратным шламом для исключения комкования волокон.

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 дисперсно-армированных пенобетонов неавтоклавного твердения. В экспериментальной части образцы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона исследованы с использованием растровой электронной микроскопии, после чего проводили их стандартизированные испытания. Структурные характеристики материала оценены методами компьютерной обработки изображений с последующим определением фрактальной размерности для разработки системы контроля и оценки качества его пористой структуры. Все исследования выполнены на современном оборудовании, обеспечив статистическую достоверность полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение эффективного теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения с улучшенными физико-механическими характеристиками;
- принципы управления процессами структурообразования теплоизоляционного пенобетона за счет снижения коалесценции пены посредством введения в пенобетон полипропиленовой фибры установленным способом;
- принципы рационального подбора сырьевых компонентов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения с обоснованием эффективности помола цемента и его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой и сульфатом алюминия в качестве ускорителя твердения со стабилизацией протеинового пенообразователя;

- закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения;

- алгоритм определения фрактальной размерности пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения с последующей оценкой его качества и корреляцией полученных значений с физико-механическими характеристиками материала;

- технологические решения производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона с оценкой его технико-экономической эффективности. Результаты апробации.

Степень достоверности результатов обеспечена: проведением обширного комплекса экспериментальных исследований, выполненных с применением разнообразных методик и современного сертифицированного высокотехнологичного оборудования в строгом соответствии с требованиями действующих нормативных документов и государственных стандартов Российской Федерации. Итоговые данные согласуются с общепринятыми научными положениями и не вступают в противоречие с выводами, представленными в трудах других исследователей. Проведенные эксперименты прошли апробацию как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VII, VIII Международных студенческих строительных форумах (Белгород, 2022, 2023), VII, VIII, X Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2023, 2024, 2026), IX Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024), VIII Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2024), XVI Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство.» (Белгород, 2024), IX Международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» (Гродно, Республика Беларусь, 2025), International Scientific and Practical Conference «ICBERG 2025» (Ташкент, Республика Узбекистан, 2025), X Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ» (Омск, 2025).

Внедрение результатов исследования. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород), где была выпущена партия плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона. Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Октябрьская в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-089-2025 «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон» и Рекомендации по производству теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

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

Публикации. Основные положения работы изложены в 19 публикациях, в том числе: 3 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получен 1 патент на изобретение и 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Личный вклад состоит в непосредственном участии на всех этапах исследования – от получения, анализа и систематизации исходных теоретических данных до практической реализации поставленных задач. Автором разработаны и внедрены принципы получения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения, основанные на созданных рецептурных и технологических решениях, выполнены подготовка и проведение комплекса экспериментальных работ, включая обработку, интерпретацию и оценку 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 221 странице машинописного текста, включающего 39 таблиц, 48 рисунков, список литературы из 240 источников, 9 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Развитие современного строительного материаловедения характеризуется необходимостью разработки долговечных, экологически безопасных и энергоэффективных материалов, применение которых обеспечивает улучшение теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и сокращение энерго- и ресурсозатрат на всех этапах жизненного цикла строительных объектов. Особую значимость в этом контексте приобретает теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон неавтоклавного твердения и изделия на его основе, в которых введение полипропиленовой фибры обеспечивает стабилизацию пенной структуры за счет уменьшения коалесценции пузырьков и одновременно повышает прочностные характеристики материала, что расширяет область его применения при теплоизоляции ограждающих конструкций зданий различного назначения.

В связи с этим *рабочей гипотезой исследования* стало предположение о том, что повышение физико-механических характеристик теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения возможно за счет увеличения удельной поверхности цемента, введения сульфата алюминия как полифункциональной добавки, дисперсного армирования пенобетонной смеси полипропиленовой фиброй с установленными геометрическими параметрами, а также развития системы контроля и оценки качества структуры полученных пенобетонов, в том числе с применением методов фрактального анализа.

Для подбора и получения рациональных составов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона использовались следующие сырьевые компоненты: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (АО «Белгородский цемент»); полипропиленовые фибры ООО ПК «Альянс», Россия (далее – фибра I) и Chuangsheng, Китай (далее – фибра II); протеиновые пенообразователи «Экопен» (ООО «ВЕХА»), «Rospena» (ООО «РОСПЕНА»), «Foam X» (ООО «Биопор»); ускоритель твердения сульфат алюминия ($Al_2(SO_4)_3$) (ООО «АКВАХИМ»); суперпластификатор Elocrete (ООО «Полипласт-Юг»).

Для подтверждения рабочей гипотезы в части возможности повышения физико-механических характеристик и обоснования практического применения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона исследован механизм снижения коалесценции пены за счет введения в состав пенобетона полипропиленовой фибры с установленными геометрическими параметрами волокон.

Формирование пористой структуры пенобетона представляет собой эволюцию пенной системы в твердое пористое тело, которое с точки зрения неравновесной термодинамики можно рассматривать как процесс самоорганизации, где одновременно действуют два противоположных механизма: дестабилизация пены за счет коалесценции пузырьков и ее стабилизация благодаря росту вязкости среды и формированию твердеющего каркаса из частиц цемента. Устойчивость структуры достигается только при балансе данных процессов, когда система приходит в стационарное неравновесное состояние.

Коалесценция в свежеприготовленной смеси описывается теорией устойчивости ДЛФО (Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека), а ее движущей силой является стремление системы к минимизации избыточной свободной энергии межфазной поверхности. Кинетика истончения и последующего разрыва жидких пленок между пузырьками описывается молекулярно-кинетической теорией, согласно которой скорость этого процесса обратно пропорциональна вязкости дисперсионной среды. В концентрированной цементной суспензии эффективная вязкость резко возрастает с увеличением объемной доли твердой фазы по уравнению Эйнштейна–Батчелора. Установлено, что при объемной концентрации цемента 0,35–0,45 эффективная вязкость системы увеличивается от 200–300 до 800–1200 мПа·с, что приводит к замедлению коалесценции в 2,5–4,0 раза. Дополнительную стабилизацию обеспечивает сдерживание в межпузырьковых перегородках структурных секток из продуктов коагулирующих частиц цемента и ранней гидратации, создающих стерический барьер для сближения пузырьков.

Введение полипропиленовой фибры в состав пенобетонной смеси подавляет коалесценцию пузырьков сразу на нескольких уровнях. Установлено, что на геометрическом уровне волокна образуют пространственную сетку, при этом расстояние между ними сравнимо с радиусом пузырьков R . На реологическом уровне из-за высокого отношения длины l к диаметру d волокон ($l/d = 120\text{--}600$) эффективная вязкость смеси возрастает до 19 %.

Рациональная концентрация фибры определяется условием максимизации стабилизирующего эффекта при сохранении технологичности смеси. Нижняя граница концентрации фибры ($0,4 \text{ кг/м}^3$ при $R = 0,5 \text{ мм}$, $l = 12 \text{ мм}$, $d = 20 \text{ мкм}$) обеспечивает как минимум одно пересечение волокном перегородки характерного размера:

$$V_{\phi, \min} = (\pi d^2)/(8R^2l). \quad (1)$$

Верхняя граница ограничена началом комкования волокон и чрезмерным ростом вязкости, затрудняющим перемешивание. Установлено, что диапазон концентрации полипропиленовой фибры составляет $V_{\phi} = 0,0007\text{--}0,0013$ ($0,6\text{--}1,2 \text{ кг/м}^3$), что обеспечивает среднее расстояние между волокнами 1,0–1,4 мм.

С целью подбора сырьевых компонентов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона проведено исследование свойств цемента с различной удельной поверхностью ($S_{\text{уд}}$). Повышение удельной поверхности интенсифицирует гидратацию, но сопровождается ростом водопотребности, усадки и требует корректировки составов. Для определения рациональной дисперсности цемента

проведен его помол в роторно-шаровой мельнице. Установлено, что при достижении удельной поверхности цемента свыше 500 м²/кг начинается интенсивная агрегация частиц: ультрадисперсные фракции образуют вторичные агломераты, что снижает эффективность помола.

Исследование реологических свойств цементного теста показало, что рост удельной поверхности цемента закономерно повышает водопотребность и сокращает сроки схватывания вследствие более интенсивной гидратации тонких фракций (табл. 1).

Таблица 1 – Составы цементного теста и их реологические свойства, прочность цементного камня

№ состава	S _{уд} , м ² /кг	Elocrete, % от Ц	Al ₂ (SO ₄) ₃ , % от Ц	НГ, %	Сроки схватывания, мин		Растекаемость, мм	Прочность					
								на сжатие, МПа, сут			при изгибе, МПа, сут		
					начало	конец		3	7	28	3	7	28
1	300	-	-	25,1	150	220	125	27,8	33,2	38,3	3,9	4,6	5,3
2		0,5	-	23,3	120	195	170	29,6	36,5	41,8	4,1	5,1	5,8
3		-	1,0	24,5	100	160	115	39,5	40,5	41,0	5,5	5,6	5,7
4		0,5	1,0	24,0	70	135	130	42,0	44,5	44,7	5,9	6,2	6,2
5	350	-	-	25,7	140	210	120	30,5	36,4	42,0	4,2	5,1	5,8
6		0,5	-	23,5	110	180	145	32,5	40,0	45,8	4,5	5,6	6,3
7		-	1,0	25,1	95	155	110	43,3	44,4	44,9	6,0	6,2	6,2
8		0,5	1,0	24,2	65	130	125	46,1	48,8	49,0	6,3	6,8	6,8
9	400	-	-	26,3	135	205	115	33,7	40,2	46,4	4,7	5,6	6,4
10		0,5	-	23,8	95	170	140	35,9	44,1	50,6	5,0	6,1	7,0
11		-	1,0	25,7	90	150	105	47,9	49,0	49,6	6,7	6,8	6,8
12		0,5	1,0	24,5	60	120	120	50,9	53,9	54,2	7,1	7,5	7,5
13	450	-	-	26,6	130	200	110	36,8	43,9	50,7	5,1	6,1	7,0
14		0,5	-	24,0	85	160	135	39,2	48,2	55,3	5,4	6,7	7,6
15		-	1,0	26,0	55	145	100	52,3	53,6	54,2	7,2	7,4	7,5
16		0,5	1,0	24,7	55	115	115	55,6	58,8	59,2	7,7	8,2	8,2
17	500	-	-	27,4	125	195	105	39,8	47,4	54,8	5,5	6,5	7,5
18		0,5	-	24,2	70	150	130	42,3	52,0	59,8	5,9	7,1	8,2
19		-	1,0	26,8	80	135	95	56,5	57,8	58,6	7,8	7,9	8,0
20		0,5	1,0	24,9	50	110	110	60,1	63,5	64,0	8,3	8,7	8,8

Комплексная модификация суперпластификатором Elocrete (0,5 % от Ц) и сульфатом алюминия (1,0 % от Ц) при дисперсности цемента 450–500 м²/кг обеспечивает снижение водопотребности и наибольшую прочность бетона на сжатие и при изгибе. Введение сульфата алюминия способствует образованию высокодисперсного аморфного гидроксида алюминия (Al(OH)₃) в цементной системе, который ускоряет процесс гидратации с образованием двухводного гипса.

Проведены исследования кратности пен из протеиновых пенообразователей, результаты которых представлены на рисунке 1.

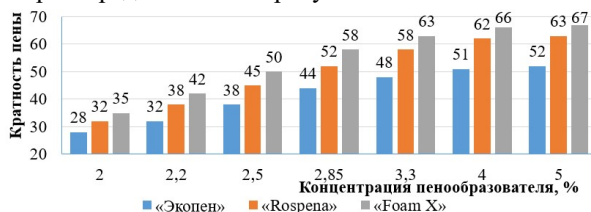


Рисунок 1 – Влияние концентрации пенообразователей на кратность пены

Установлено, что увеличение содержания пенообразователей с 2 до 5 % сопровождается монотонным ростом кратности пены. Сравнительная оценка пенообразователей выявила преимущества пенообразователя «Foam X», стабильность его

пены на 61 % выше, а интенсивность дренирования на 22 % ниже, чем у аналогов. Изучено влияние комплексной модификации цемента на свойства пены. В частности, введение сульфата алюминия до 1,0 % приводит к росту кратности и существенному снижению водоотделения (рис. 2).

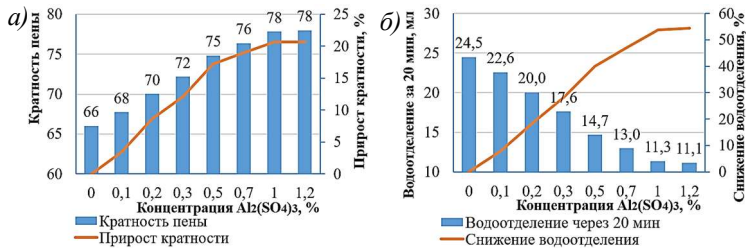


Рисунок 2 – Влияние концентрации сульфата алюминия на свойства пены: а – кратность; б – водоотделение через 20 мин

Положительный эффект сульфата алюминия в пене обусловлен стабилизирующим механизмом действия, при котором аморфный гидроксид алюминия $Al(OH)_3$ формируют более прочную адсорбционную пленку на границе «газ – жидкость», продукты частичного гидролиза сульфата проявляют коллоидные свойства и дополнительно стабилизируют пену за счет механического армирования межпузырьковых перегородок тонкодисперсными частицами, что приводит к сохранению пенной структуры.

Для обоснования выбора геометрических параметров полипропиленовой фибры при дисперсном армировании теплоизоляционного пенобетона проведен сравнительный эксперимент с волокнами длиной 6, 9 и 12 мм. Установлено, что введение полипропиленовой фибры большей длины обеспечивает прирост прочности бетона на сжатие (рис. 3) и при изгибе (рис. 4) за счет формирования в цементной матрице пространственной сетчатой структуры, препятствующей взаимному смещению частиц и улучшающей сцепление волокна с цементным камнем, тогда как волокна длиной 6 мм образуют меньшую площадь контакта с матрицей и, соответственно, ограниченный армирующий эффект.

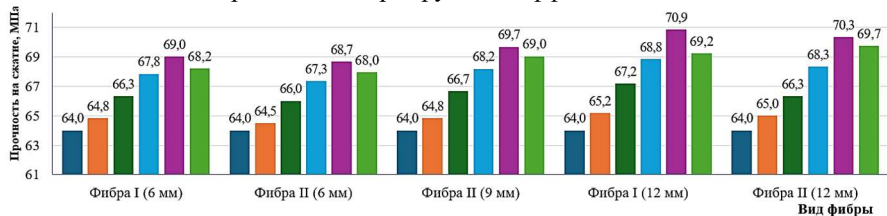


Рисунок 3 – Прочность на сжатие цементных образцов с полипропиленовой фиброй при расходе фибры: ■ – 0 кг/м³; ■ – 0,3 кг/м³; ■ – 0,6 кг/м³; ■ – 0,9 кг/м³; ■ – 1,2 кг/м³; ■ – 1,5 кг/м³

Наряду с этим установлено, что увеличение расхода полипропиленовой фибры до 1,2 кг/м³ закономерно повышает показатели прочности бетона на сжатие и при изгибе вследствие способности волокон сдерживать развитие микротрещин, однако при превышении расхода фибры прирост прочности замедляется или сменяется ее снижением, что обусловлено ухудшением удобоукладываемости смеси, комкованием волокон, а также со снижением модуля упругости в межфазной переходной зоне между волокном и цементным камнем.

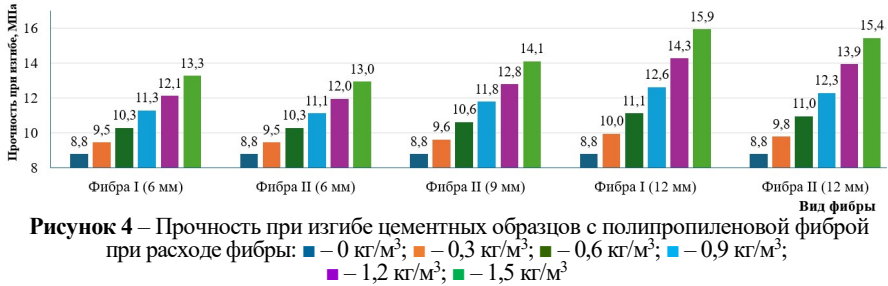


Рисунок 4 – Прочность при изгибе цементных образцов с полипропиленовой фиброй при расходе фибры: ■ – 0 кг/м³; ■ – 0,3 кг/м³; ■ – 0,6 кг/м³; ■ – 0,9 кг/м³; ■ – 1,2 кг/м³; ■ – 1,5 кг/м³

Микроструктурный анализ (рис. 5) показал, что волокна сохраняют геометрическую целостность, на их поверхности формируется слой гидратных новообразований (C–S–H-гель и портландит), обеспечивающий фрикционное сцепление с цементной матрицей. Наиболее стабильную структуру без дефектов демонстрируют образцы цементного камня с полипропиленовой фиброй I длиной 6 и 12 мм и фиброй II длиной 12 мм, которые использованы в дальнейших исследованиях.

Для изучения влияния геометрических параметров волокон фибр на пористость пенобетона марки по средней плотности D300 проведены исследования его пористой структуры (рис. 6).

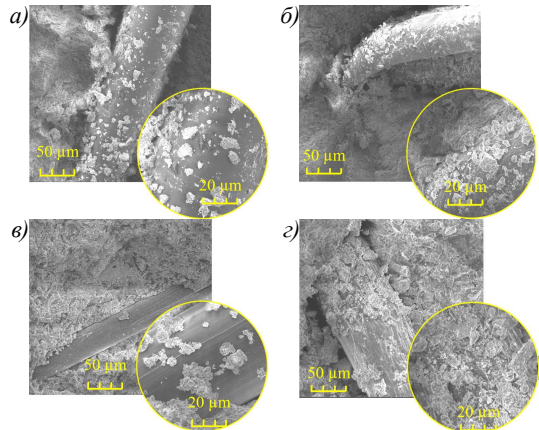


Рисунок 5 – Микроструктура цементного камня с полипропиленовой фиброй: а – фибра I (6 мм); б – фибра I (12 мм); в – фибра II (6 мм); г – фибра II (12 мм)

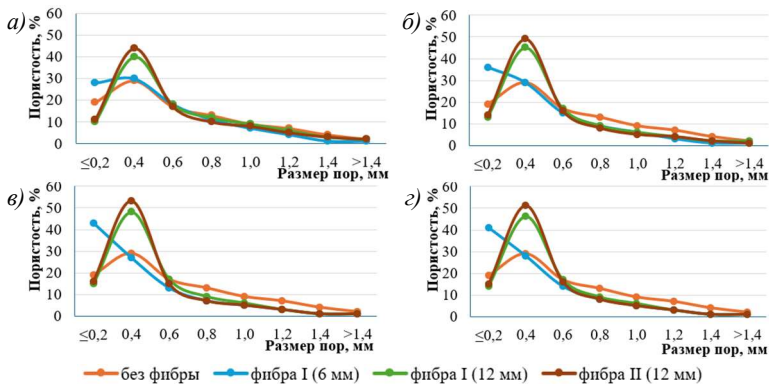


Рисунок 6 – Влияние геометрических параметров полипропиленового волокна на пористость дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности D300 при расходе полипропиленовой фибры: а – 0,3 кг/м³; б – 0,6 кг/м³; в – 0,9 кг/м³; г – 1,2 кг/м³

Установлено, что в диапазоне расхода полипропиленовой фибры 0,6–1,2 кг/м³ достигается наиболее выраженная стабилизация пористой структуры пенобетона для всех исследованных типоразмеров волокна с уменьшением доли крупных пор по сравнению с контрольным составом без армирования, что свидетельствует о снижении коалесценции пузырьков. При дальнейшем увеличении расхода фибры наблюдается ухудшение параметров структуры, связанное с избыточной концентрацией волокон в объеме материала.

Для изучения синергетического эффекта при дисперсном армировании теплоизоляционного пенобетона исследовано совместное применение полипропиленовых фибр с длиной волокон 6 и 12 мм в различных соотношениях (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние соотношения полипропиленовых фибр с длиной волокон 6 и 12 мм на распределение пор дисперсно-армированного пенобетона по размерам

Состав (6 мм : 12 мм)	Размер пор, мм*								d_{cp} , мкм									
	<0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	0,8–1,0	1,0–1,2	1,2–1,4	>1,4										
Без фибры	18,4	32,1	17,2	12,6	8,5	5	3,1	3,1	705									
100:0	21,6	22,5	31,4	32,0	17,8	18,0	12,4	12,5	7,6	7,0	4,5	4,0	2,7	2,0	2,0	631	610	
70:30	22,8	23,5	30,9	31,3	18,5	19,0	12,7	12,8	7,4	6,8	4,1	3,8	2,3	1,8	1,3	1,0	598	580
50:50	24,1	25,0	30,5	31,0	19,2	19,5	12,6	12,5	6,8	6,3	3,6	3,2	2,0	1,5	1,2	1,0	566	555
30:70	25,3	26,0	30,2	31,0	19,8	20,0	12,5	12,4	6,3	6,0	3,2	2,8	1,7	1,0	1,0	0,8	534	530
0:100	23,7	24,5	30,6	31,2	19,0	19,3	12,8	12,7	7,0	6,5	3,9	3,5	1,9	1,5	1,1	0,8	553	540

*Примечание: значения слева для составов с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм); справа – для составов с фиброй I (6 и 12 мм)

Соотношение 30:70 волокон полипропиленовой фибры длиной 6 и 12 мм подтвердило свою эффективность как наилучшая двухуровневая система стабилизации, обеспечивая снижение среднего диаметра пор до 530 мкм и сокращение доли укрупненных пор по сравнению с неармированным составом.

Исследования центральной и периферийной зон образцов дисперсно-армированного пенобетона (табл. 3) показали, что при расходе полипропиленовой фибры 0,9 кг/м³ доля крупных пор в центральной и периферийной зонах снижается. Такая высокая пространственная однородность структуры подтверждает, что волокна различной длины формируют каркас, ограничивающий подвижность пузырьков по всему объему материала.

Таблица 3 – Влияние расхода полипропиленовой фибры (соотношение 30:70, волокна 6 мм и 12 мм) на распределение пор по размерам в различных зонах теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности D300

Расход фибры, кг/м ³	Размер пор центральной зоны*						Размер пор периферийной зоны*					
	<0,2 мм, %	0,2–1 мм, %	>1 мм, %		<0,2 мм, %		0,2–1 мм, %	>1 мм, %				
0	18,4	70,4	11,2		22,5		60,1	17,4				
0,3	30,8	31,0	54,3	55,0	14,9	14,0	29,0	28,8	52,6	52,8	18,4	18,4
0,6	33,8	34,3	55,1	55,8	11,1	9,9	30,5	36,5	54,4	54,0	15,1	9,5
0,9	41,0	43,5	52,6	55,0	6,4	1,5	37,0	43,0	55,5	54,0	6,5	4,0
1,2	37,5	39,0	55,2	57,8	7,3	3,2	38,7	41,0	53,3	53,3	8,0	5,7

*Примечание: значения слева для составов с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм); справа – для составов с фиброй I (6 и 12 мм)

Синергетический эффект дисперсного армирования теплоизоляционного пенобетона полипропиленовой фиброй с установленными геометрическими параметрами волокон количественно характеризуется коэффициентом синергии K_s ,

рассчитываемым как отношение фактического улучшения параметра (доли пор менее 1 мм) к ожидаемому при аддитивном сложении эффектов моноармирования:

$$K_s = \frac{\Delta P_{(6+12 \text{ мм})}}{\Delta P_{6\text{мм}} \cdot 0,3 + \Delta P_{12\text{мм}} \cdot 0,7}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{(6+12 \text{ мм})}$ – относительное изменение параметра при дисперсном армировании полипропиленовой фиброй с длиной волокон 6 и 12 мм по сравнению с контрольными значениями без фибры; $\Delta P_{6\text{мм}}$ – то же, при армировании фиброй длиной 6 мм; $\Delta P_{12\text{мм}}$ – то же, при армировании фиброй длиной 12 мм. Так, $K_s^{30:70} = 1,39$; $K_s^{50:50} = 1,28$; $K_s^{70:30} = 1,19$. Значение $K_s > 1$ подтверждает наличие положительного синергетического эффекта, превышающего простое суммирование эффектов отдельных компонентов до 39 %.

Для рационализации состава теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона использован метод математического планирования эксперимента с варьированием факторов: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,4 до 0,6 с интервалом варьирования 0,1; удельная поверхность цемента (X_2) в пределах от 300 до 500 м²/кг с интервалом варьирования 100; расход полипропиленовой фибры (X_3) в пределах от 0,6 до 1,2 кг с интервалом варьирования 0,3. Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными.

Получены экспериментально-статистические модели влияния управляющих технологических факторов на среднюю плотность (ρ_{cp}) и прочность на сжатие ($R_{сж}$) теплоизоляционного пенобетона с дисперсным армированием фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) (3), (4):

$$\rho_{cp} = 205,59 + 0,81 \cdot X_1 - 34,82 \cdot X_2 + 7,00 \cdot X_3 + 4,36 \cdot X_1^2 - 6,09 \cdot X_2^2 + 39,89 \cdot X_3^2 - 0,78 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,15 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,18 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (3)$$

$$R_{сж} = 0,92 - 0,09 \cdot X_1 - 0,01 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_3 + 0,15 \cdot X_1^2 - 0,05 \cdot X_2^2 + 0,08 \cdot X_3^2 + 0,08 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,03 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (4)$$

с дисперсным армированием фиброй I (6 и 12 мм) (5), (6):

$$\rho_{cp} = 202,83 + 1,40 \cdot X_1 - 37,50 \cdot X_2 + 9,30 \cdot X_3 + 4,30 \cdot X_1^2 - 6,20 \cdot X_2^2 + 40,80 \cdot X_3^2 - 1,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,50 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,25 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (5)$$

$$R_{сж} = 0,84 - 0,05 \cdot X_1 - 0,04 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_1^2 - 0,03 \cdot X_2^2 + 0,03 \cdot X_3^2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,02 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (6)$$

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие. Комплексное представление о влиянии В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры на выходные параметры дисперсно-армированного пенобетона отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей (рис. 7 и 8).

Установлено, что удельная поверхность цемента является критическим параметром для пенобетонов марок по средней плотности D150–D200, где недостаточная дисперсность замедляет набор прочности и вызывает коалесценцию пор, а повышенная – обеспечивает устойчивость структуры, при этом армирующее действие полипропиленовой фиброй снижает усадочные деформации.

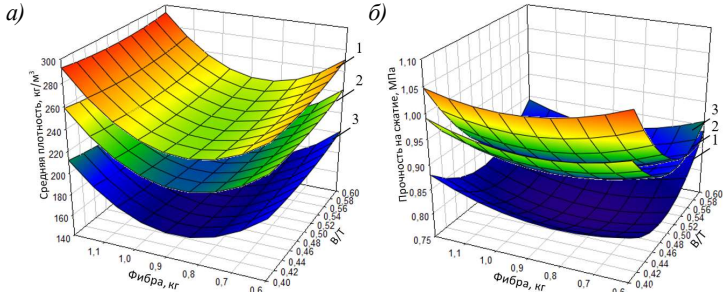


Рисунок 7 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, расхода фибры и удельной поверхности цемента: 1 – $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2 – $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$

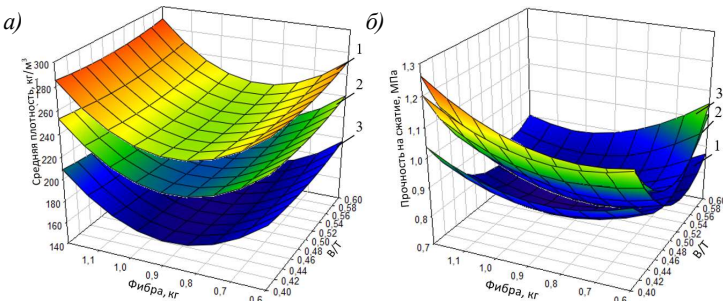


Рисунок 8 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 и 12 мм) от В/Т, расхода фибры и удельной поверхности цемента: 1 – $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2 – $S_{уд} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$

По результатам исследований разработаны составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изучены изменения физико-механических характеристик в зависимости от содержания сырьевых компонентов. Составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона (на 1 м^3) и его физико-механические характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона (на 1 м^3) и его физико-механические характеристики

№ п/п	Цемент, кг	Фибра I (6 мм), кг	Фибра I (12 мм), кг	Фибра II (12 мм), кг	Пенообразователь «Foam X», кг	Сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, кг	Суперпластификатор Elocrete, кг	Удельная поверхность цемента, $\text{м}^2/\text{кг}$	В/Т	Средняя плотность $\rho_{ср}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие $R_{сжк}$, МПа	Класс по прочности на сжатие	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	Водопоглощение, %	Усадка, мм/м
1	1180	270	63	-	4,72	1,18	0,59	500	0,5	157	D150	0,63	B0,35	0,29	0,055	0,20	18	2,0
2	1570	180	42	-	6,28	1,57	0,79	500	0,6	201	D200	0,94	B0,75	0,38	0,058	0,17	16	1,9
3	1960	18	-	0,42	7,84	1,96	0,98	400	0,5	256	D250	1,12	B0,75	0,37	0,062	0,17	16	1,8
4	2260	360	84	-	9,04	2,26	1,13	300	0,4	292	D300	1,29	B1	0,62	0,065	0,13	15	1,8

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность применения цемента с повышенной удельной поверхностью и полипропиленовой фибры с длиной волокна 6 и 12 мм в соотношении 30:70 в качестве дисперсного армирования теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности $D150$ – $D300$, обеспечивающих класс по прочности на сжатие $B0,35$ – $B1$ при коэффициенте теплопроводности $0,055$ – $0,065$ Вт/(м·°С).

Микроструктурный анализ разработанных теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов показал, что при снижении марки по средней плотности от $D300$ к $D150$ доля мелких пор увеличивается, а их пористая структура становится более однородной (рис. 9).

Синергетический механизм стабилизации пористой структуры посредством дисперсного армирования пенобетона полипропиленовой фиброй реализуется как двухуровневая система, где волокна длиной 12 мм формируют пространственный каркас, ограничивающий перемещения пузырьков, а волокна длиной 6 мм с высокой плотностью распределения локально армируют пленочные оболочки и межпоровые перегородки, предотвращая их разрыв и коалесценцию. Совместное действие полипропиленовой фибры с установленными геометрическими параметрами приводит к снижению доли укрупненных пор теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

Для развития системы контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона использован метод фрактального анализа, в частности, фрактальная размерность D_p , характеризующая сложность распределения пор в структуре материала. Разработан способ ее определения, особенностью которого является последовательное изменение разрешения изображения поверхности образца пенобетона с определением на каждом этапе количества пикселей, относящихся к границам пор материала. Для каждого разрешения с высотой пикселя h подсчитывается число пикселей пор N и строится логарифмическая зависимость, и по тангенсу угла наклона полученной прямой вычисляется фрактальная размерность. Сравнительные испытания на образцах марок по средней плотности $D150$ – $D300$ показали, что разработанный способ обеспечивает большие коэффициенты детерминации (рис. 10) по отношению к традиционно применяемому методу подсчета ячеек,

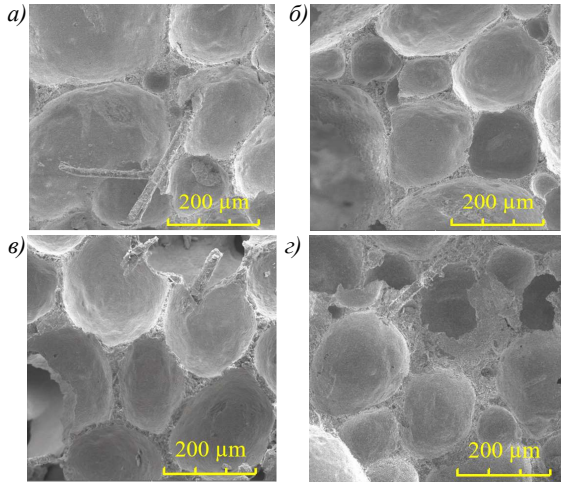


Рисунок 9 – Микроструктура образцов дисперсно-армированного пенобетона: а – марки по средней плотности $D300$; б – марки по средней плотности $D250$; в – марки по средней плотности $D200$; г – марки по средней плотности $D150$

что указывает на повышенную чувствительность к тонким особенностям поровой структуры и позволяет надежнее дифференцировать материалы по однородности и развитости порового пространства.

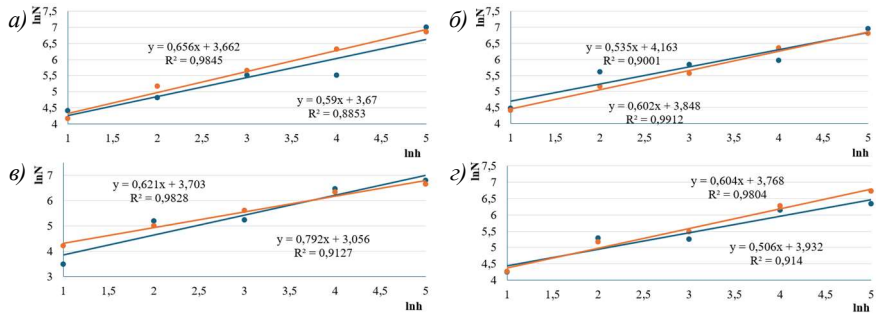


Рисунок 10 – Логарифмические зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ для образцов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности: а – $D150$; б – $D200$; в – $D250$; г – $D300$; — метод подсчета ячеек; — разработанный способ

Установлено, что для составов $D250$ – $D300$ характерны относительно низкие значения фрактальной размерности $D_p = 1,74$ – $1,82$, в то время как для сверхлегких теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов марок по средней плотности $D150$ – $D200$ значения D_p возрастают до диапазона $1,88$ – $1,95$, что отражает усложнение геометрии порового пространства. При этом средние значения фрактальной размерности для исследованных марок составляют, $D_p = 1,74 \pm 0,04$ – для пенобетона марки по средней плотности $D300$;

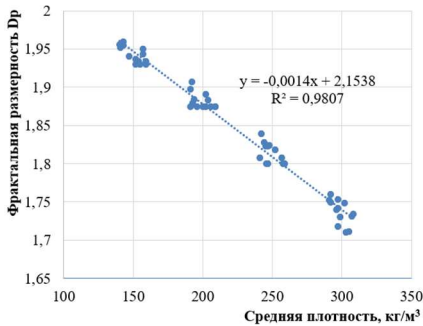


Рисунок 11 – Зависимость средней плотности теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона от фрактальной размерности его пористой структуры

Предложена технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе, особенностью которой является помол цемента в роторно-шаровой мельнице и введение полипропиленовой фибры в состав пенобетонной смеси совместно с обратным шлаком для исключения комкования волокон.

Разработаны стандарт организации СТО 02066339-089-2025 «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон» и Рекомендации по производству

теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона. Результаты исследований апробированы в промышленных условиях на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ», где была выпущена партия плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о процессах структурообразования теплоизоляционного пенобетона на основе механизма снижения коалесценции пузырьков пены за счет оптимизации концентрации твердой фазы и дисперсного армирования.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона за счет применения цемента с удельной поверхностью до $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой и сульфатом алюминия в качестве ускорителя твердения и стабилизатора пены протеинового пенообразователя, полипропиленовой фибры с установленными геометрическими параметрами волокна. Данное решение обеспечивает формирование однородной пористой структуры теплоизоляционного пенобетона с обеспечением марки по средней плотности $D150\text{--}D300$.

Установлены закономерности влияния геометрических параметров полипропиленовой фибры на процесс коалесценции пузырьков пены при формировании пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона. Показано, что увеличение длины полипропиленового волокна с 6 до 12 мм снижает рост плотности пены во времени и уменьшает средний диаметр пор затвердевшего пенобетона. Выявлен синергетический эффект дисперсного армирования пенобетона полипропиленовой фиброй с длиной волокон 6 и 12 мм при их соотношении 30:70, превышающий результат суммирования эффектов отдельных компонентов дисперсного армирования на 39 %.

Разработаны экспериментально-статистические модели, определяющие влияние водотвердого отношения, удельной поверхности цемента и расхода полипропиленовой фибры на среднюю плотность и прочность на сжатие теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

Обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и эффективность применения цемента с удельной поверхностью до $500 \text{ м}^2/\text{кг}$, его комплексной модификации суперпластифицирующей добавкой Elocrete и сульфатом алюминия в качестве как ускорителя твердения в количестве 1 % с образованием высокодисперсного аморфного гидроксида алюминия в цементной системе, так и стабилизатора протеинового пенообразователя «Foam X», а также полипропиленовой фибры с длиной волокон 6 и 12 мм при их соотношении 30:70 для дисперсного армирования теплоизоляционного пенобетона. Получены рациональные составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности $D150\text{--}D300$, обеспечивающих класс по прочности на сжатие $B0,35\text{--}B1$ при коэффициенте теплопроводности $0,055\text{--}0,065 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Разработана система контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов, основанная на определении ее фрактальной размерности путем последовательного изменения разреше-

ния изображения поверхности пенобетона. Установлена корреляционная зависимость между значениями фрактальной размерности пористой структуры материала и его физико-механическими показателями.

Предложена технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе, особенностью которой является помол цемента в роторно-шаровой мельнице и введение полипропиленовой фибры в состав пенобетонной смеси совместно с обратным шламом для исключения комкования волокон.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности предприятий по производству изделий из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований: целесообразно рассматривать в направлении углубленного изучения влияния типа, геометрических параметров и массовой доли волокон фибры для дисперсного армирования на процессы коалесценции пузырьков пены, распределение пор по размерам, а также применение методов машинного обучения для прогнозирования характеристик дисперсно-армированных пенобетонов по параметрам состава и структуры.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

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

1. Сулейманова, Л. А. Исследование пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов методом анализа изображений / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, **М. А. Богачева** // Components of Scientific and Technological Progress. – 2026. – № 1(115). – С. 35-41. (K3)

2. Сулейманова, Л. А. Исследование влияния технологических факторов дисперсного армирования на прочностные характеристики ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, А. И. Кудяков, И. А. Погорелова, **М. А. Богачева** // Вестник Евразийской науки. - 2025. - Т. 17, № 4 – URL: <https://esj.today/PDF/15SAVN425.pdf>. (K2)

3. Сулейманова Л. А. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, И. С. Рячевский, И. А. Погорелова, **М. А. Богачева** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 8-15. (K1)

В сборниках конференций

4. Сулейманова Л. А. Методы определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, **М. А. Богачева** // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов X Международной научно-практической конференции, приуроченной к 95-летию основания ФГБОУ ВО «СибАДИ». – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2026. – С. 292-297.

5. Сулейманова, Л. А. Исследование механизма формирования и стабильности пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона / Л. А. Сулейманова, В. В. Строкова, И. А. Погорелова, **М. А. Богачева** // Наука и

инновации в строительстве: сб. докл. X Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2026. – С. 432-437.

6. **Богачева М.А.** Фрактальные кластеры и межфазные взаимодействия в фибропенобетоне / М. А. Богачева // в сборнике: IX Международная научная конференция молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения». – Беларусь, г. Гродно ГрГУ им. Янки Купалы, 2025. – С. 712-717.

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

8. **Богачева М. А.** Исследование прочности бетонов, армированных полипропиленовой фиброй / М. А. Богачева, Д. Э. Левшин // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VIII Междун. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 325-328.

9. **Сулейманова Л. А.** Повышение эксплуатационных свойств ячеистого бетона путем микроармирования полипропиленовой фиброй / Л. А. Сулейманова, **М. А. Богачева** // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов VIII международной научно-технической конференции. – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. – С. 387-390.

10. **Богачева М. А.** Экспериментальное исследование прочности образцов, армированных полипропиленовой фиброй / М. А. Богачева, Д. Э. Кравченко, Д. Э. Левшин // Образование. Наука. Производство: сб. докл. XVI Международного молодежного форума. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 10-12.

11. **Богачева М. А.** Применение дисперсно армированных бетонов в строительстве / М. А. Богачева // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т. 2. – С. 131-134.

12. **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.

13. **Рябчевский, И. С.** Микроармирующие волокна для фибропенобетона / И. С. Рябчевский, **М. А. Богачева** // VII Международный студенческий строительный форум - 2022: сб. докл. VII Международного студенческого строительного форума. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 269-274.

14. **Богачева М. А.** Фибробетон и его применение в строительной индустрии / М. А. Богачева // VII Международный студенческий строительный форум - 2022: сб. докл. VII Международного студенческого строительного форума, Белгород. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 213-220.

Объекты интеллектуальной собственности

15. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2026681399.** Программа оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов методом фрактального анализа// **М. А. Богачева**, Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образователь-

ное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 14.07.2026.

16. Пат. RU 2848926. Способ определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов // 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. 21.10.2025.

17. Свидетельство о 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». Оpubл. 24.07.2024.

18. Свидетельство о 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.

19. Свидетельство о 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.

БОГАЧЕВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ
ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2026.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,12. Тираж 100 экз. Заказ № 118.

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