

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

На правах рукописи



БОГАЧЕВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ
ПЕНОБЕТОН НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

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

**Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Погорелова Инна Александровна**

Белгород 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	14
1.1. Современное состояние производства и применения неавтоклавных ячеистых бетонов	15
1.2. Сырьевые компоненты неавтоклавного ячеистого бетона	25
1.2.1. Вяжущие для ячеистого бетона	25
1.2.2. Пенообразователи	28
1.2.3. Модифицирующие добавки	30
1.3. Дисперсное армирование как способ управления структурой и свойствами ячеистых бетонов неавтоклавного твердения	33
1.4. Повышение эффективности теплоизоляционных дисперсно- армированных ячеистых бетонов	38
1.5. Методы контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов	49
1.5.1. Методы определения пористости ячеистых бетонов	49
1.5.2. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистых бетонов	54
1.6. Теоретические принципы получения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения	60
1.7. Выводы	63
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	65
2.1. Характеристика применяемых материалов	65
2.2. Методы исследований	75
2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов	75
2.2.2. Методы исследования физико-механических характеристик теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	81

2.2.3. Методы исследования макропористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	85
2.3. Выводы	91
3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ	93
3.1. Исследование механизма формирования и стабильности пористой структуры пенобетона в процессе твердения	93
3.2. Влияние дисперсности цемента на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора	101
3.3. Влияние параметров пенообразующей системы на кратность и стабильность пены	110
3.4. Влияние геометрических параметров полипропиленовой фибры на пористую структуру теплоизоляционного пенобетона	119
3.4.1. Подбор типоразмеров полипропиленовой фибры	119
3.4.2. Влияние длины полипропиленовой фибры на параметры пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	124
3.4.3. Синергетический эффект и кинетика коалесценции при комбинированном дисперсном армировании пенобетона	129
3.5. Выводы	137
4. СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ	139
4.1. Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на эксплуатационные свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона с применением метода математического планирования эксперимента	139
4.2. Физико-механические свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	153

4.3. Исследование микроструктуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	154
4.4. Разработка системы контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	157
4.5. Выводы	165
5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	167
5.1. Совершенствование технологической схемы производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	167
5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	173
5.3. Внедрение и апробация результатов исследования	176
5.4. Выводы	178
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	179
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182
ПРИЛОЖЕНИЯ	211
Приложение А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660735	212
Приложение Б. Патент на изобретение № 2848926.....	213
Приложение В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667396	214
Приложение Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667454	215
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026681399	216
Приложение Е. Титульный лист стандарта организации «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон. Технические условия»	217

Приложение Ж. Титульный лист рекомендаций по производству теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона	218
Приложение И. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»	219
Приложение К. Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	221

ВВЕДЕНИЕ

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 относятся 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. Основным объемом 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 м²/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 исследований 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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Обострение глобальных энергетических проблем в условиях прогрессирующих климатических изменений и прогнозируемого истощения традиционных углеводородных ресурсов придает особую значимость разработке технических решений, направленных на оптимизацию топливно-энергетического баланса различных отраслей народного хозяйства [1–9]. Применительно к строительной отрасли данная задача выражается прежде всего в необходимости существенного повышения теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений, что обуславливает устойчивый рост научного интереса к материалам, обеспечивающим высокое термическое сопротивление при одновременном снижении энергоемкости их производства.

В обозначенном контексте одним из перспективных классов строительных материалов являются теплоизоляционные дисперсно-армированные пенобетоны неавтоклавного твердения. Принципиальной особенностью данных материалов является формирование высокопористой структуры в условиях естественного твердения без применения энергоемкой автоклавной обработки, что само по себе обеспечивает значительное сокращение технологической энергоемкости производства [10–12]. Сочетание высоких теплоизоляционных характеристик пенобетонов с достаточным уровнем прочности позволяет достигать нормируемых значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций при сохранении необходимой несущей способности.

При применении пенобетонов в ограждающих конструкциях теряется меньше тепла, поэтому для отопления и кондиционирования помещений требуется меньше энергоносителей. Их экономный расход сокращает антропогенную эмиссию парниковых газов и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду, что соответствует базовым принципам концепции устойчивого развития [13–17]. Подобные материалы позволяют реализовать положения «зеленого» строительства, ориентированного на минимизацию техногенного воздействия на всем протяжении жизненного цикла объекта.

Таким образом, теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон неавтоклавного твердения обладает значительным потенциалом для повышения энергетической эффективности и экологической безопасности строительных систем. Их применение отвечает актуальным требованиям ресурсосбережения, формируя научно-технические предпосылки для создания более устойчивой и ресурсоэффективной строительной инфраструктуры.

1.1. Современное состояние производства и применения неавтоклавных ячеистых бетонов

Современный строительный комплекс Российской Федерации работает в условиях последовательного ужесточения нормативных требований к тепловой защите ограждающих конструкций зданий и сооружений. Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» [6] задает правовую основу государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, формируя организационно-правовые механизмы, стимулирующие внедрение ресурсосберегающих технологий в строительном производстве. СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [5] устанавливает требования к тепловой защите объектов капитального строительства. Для ограждающих конструкций документ задает нормируемые значения приведенного сопротивления теплопередаче в зависимости от климатических условий района строительства.

Рост требований к энергоэффективности строительной отрасли и переход к использованию возобновляемого и вторичного сырья поддерживают спрос на стеновые и теплоизоляционные материалы из неавтоклавных ячеистых бетонов, прежде всего пенобетонов [18, 19]. Их присутствие в структуре спроса становится заметнее. Интерес к этим материалам связан с сочетанием технических свойств. Высокая пористость макроструктуры снижает теплопроводность, небольшая объемная масса уменьшает нагрузку на несущие конструкции и фундаменты, а возможность организовать производство без энергозатратного автоклавного оборудования сокращает капитальные и эксплуатационные издержки [20-25].

Ячеистые бетоны как класс строительных материалов имеют более чем столетнюю историю. Начало данному направлению было положено работами чешского инженера Э. Гофмана, запатентовавшего в 1889 г. способ получения пористого искусственного камня посредством аэрации вяжущих смесей путем выделения углекислого газа при взаимодействии карбонатных составляющих с кислотным агентом. Существенный вклад в развитие газобетонных технологий внесли американские изобретатели Дж. В. Айлворт и Ф. А. Дайер, предложившие в 1914 г. использовать в качестве газообразователя порошки алюминия и цинка, реагирующих в щелочной известковой среде с выделением водорода; данное решение принято считать непосредственным прообразом современных технологий газобетона [26-28]. Практически применимая технология автоклавного газобетона была разработана шведским архитектором и изобретателем Ю. А. Эрикссоном в ходе исследований на кафедре строительной техники Королевского технологического института (Стокгольм, Швеция) в начале 1920-х гг.; соответствующий патент был получен в 1924 г. Исходный состав, предложенный Ю. Эрикссоном, представлял собой смесь обожженной извести, тонкомолотого кремнеземистого компонента и алюминиевого порошка без введения портландцемента, а промышленный запуск производства по данной технологии был осуществлен в ноябре 1929 г. на заводе в Иксхульте (Швеция) под торговой маркой «Ytong». Параллельно финским инженером Л. Форсеном совместно со шведским инженером И. Эклундом в рамках Цементно-бетонной лаборатории в Лимхамне (Швеция) в 1934 г. была разработана альтернативная рецептура «Sirorex» на основе портландцемента с тонкомолотым кремнеземистым компонентом без введения извести, что разграничило два самостоятельных технологических направления производства автоклавного газобетона, сохраняющихся в мировой практике по настоящее время [29-31].

В тот же период (в первой четверти XX в.) были проведены первые систематические исследования по пенобетону. В 1911 г. датский инженер Э. С. Байер впервые предложил метод получения ячеистого бетона путем смешения предварительно приготовленной устойчивой механической пены с цементным

вяжущим, а к 1923–1925 гг. данная технология получила промышленное применение – первоначально в Германии, а впоследствии и в других европейских странах, – что нашло отражение в первых научных работах, посвященных пенобетону как самостоятельному классу ячеистых бетонов. Принципиальное технологическое различие двух направлений было обозначено уже в тот период: газобетон формирует поровую структуру за счет химической реакции газовыделения непосредственно в объеме смеси, тогда как пенобетон получают путем предварительного приготовления технической пены и последующего смешения ее с цементным тестом или суспензией – принцип, сохраняющийся неизменным и в современных технологиях [32–34].

Интенсивное развитие производства ячеистых бетонов в Советском Союзе, и прежде всего пенобетона, началось в 1930-х гг.; к середине 1950-х гг. были сформированы первые нормативные и технологические основы производства, ориентированного на нужды массового крупнопанельного домостроения. В 1959–1960 гг. в СССР было введено в промышленную эксплуатацию десять крупных заводов по производству ячеистобетонных изделий производительностью по 200 тыс. м³/год каждый, функционировавших на основе автоклавных технологий с применением оборудования польского производства. На протяжении 1960–1980-х гг. в стране последовательно велись научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по совершенствованию технологии неавтоклавных ячеистых бетонов, направленные на снижение средней плотности изделий, повышение класса прочности на сжатие и морозостойкости, а также сокращение усадочных деформаций при естественном твердении [32, 34]. Требования к показателям качества ячеистого бетона были закреплены нормативно в ГОСТ 25485-89, введенном в действие с 1 января 1990 г. и заложившем базовую систему классификации этих материалов по назначению, условиям твердения, виду вяжущего и способу порообразования; в части неавтоклавных ячеистых бетонов (указанный стандарт в настоящее время заменен действующим ГОСТ 25485-2019 [35]).

После распада СССР в 1991 г. государственная программа масштабного наращивания производства ячеистобетонных изделий была свернута, однако именно в 1990–2000-х гг. сформировался новый технологический уклад в области неавтоклавных пенобетонов: появилось значительное число малых и средних предприятий, использующих относительно простое и доступное оборудование для производства поризованных смесей непосредственно на объектах строительства или на площадочных производствах. В этот период произошел переход от моноэлементных цементных рецептур к многокомпонентным составам с применением тонкомолотых минеральных добавок – микрокремнезема, золы-уноса тепловых электростанций, металлургических шлаков, – что позволило существенно улучшить однородность и стабильность пористой структуры, снизить водоотделение пенобетонной смеси и повысить прочность межпоровых перегородок [34].

В 2000-е гг. в отечественной науке сложилось самостоятельное направление исследований, посвященное разработке композиционных вяжущих низкой водопотребности для неавтоклавных ячеистых бетонов, сочетающих клинкерный компонент с тонкодисперсными активными и инертными минеральными наполнителями различного состава и происхождения. Теоретическое и экспериментальное обоснование применения таких вяжущих нашло подтверждение в ряде исследовательских работ, в которых было установлено, что введение комплекса минеральных добавок обеспечивает ускорение структурообразования пенобетонной смеси, повышение агрегативной устойчивости пены и, как следствие, формирование регулярной поровой структуры с пониженной дефектностью межпоровых перегородок [36-39].

В период 2010-х – 2020-х гг., по мере нарастания требований к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций, закрепленных в [5] с поэтапным ужесточением нормируемых показателей, в центре внимания исследователей оказались теплоизоляционные ячеистые бетоны низкой плотности (марок по средней плотности $D150$ – $D400$ [35]), разработка которых ориентирована на обеспечение требуемых значений термического сопротивления при

минимальной толщине ограждающих конструкций. Параллельно интенсивно развивалось направление дисперсного армирования пенобетонов волокнистыми материалами – стальными, базальтовыми и полимерными фибрами, применение которых позволило частично компенсировать хрупкость матрицы неавтоклавного пенобетона и повысить его трещиностойкость [40-43].

Согласно классификации, закрепленной в ГОСТ 5742–2021 [44], теплоизоляционные изделия из ячеистых бетонов автоклавного и неавтоклавного твердения различают по типу, марке по средней плотности и температуре применения. Эти признаки задают область использования изделий, требования к их физико-механическим и теплофизическим характеристикам, а также условия эксплуатации в составе тепловой изоляции строительных конструкций и промышленного оборудования (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Физико-механические и теплофизические характеристики изделий из теплоизоляционного ячеистого бетона в соответствии с маркой по средней плотности

Марка по средней плотности	Область теплоизоляционного применения	Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°C), не более	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5
D100	Тепловая изоляция строительных конструкций	–	0,049	–
D150	Тепловая изоляция строительных конструкций	0,08	0,055	–
D200	Тепловая изоляция строительных конструкций	0,09	0,060	0,30
D250	Тепловая изоляция строительных конструкций	0,10	0,070	0,28
D300	Тепловая изоляция строительных конструкций и промышленного оборудования	0,15	0,080	0,26

1	2	3	4	5
D350	Тепловая изоляция строительных конструкций и промышленного оборудования	0,30	0,090	0,25
D400	Тепловая изоляция строительных конструкций и промышленного оборудования	0,30	0,110	0,23
D500	Тепловая изоляция промышленного оборудования	—	0,120	0,20
D600	Тепловая изоляция промышленного оборудования	—	0,140	0,16

Конструкционные и конструкционно-теплоизоляционные ячеистые бетоны оценивают по совокупности прочностных и теплотехнических показателей [45]. При оценке теплоизоляционных материалов учитывают прежде всего среднюю плотность, теплопроводность в сухом и увлажненном состояниях, паропроницаемость и способность сохранять целостность при транспортировании, монтаже и эксплуатации.

К настоящему времени совокупность накопленных научных знаний и технологических решений в области неавтоклавных ячеистых бетонов охватывает широкий круг взаимосвязанных направлений: управление процессами поризации и порообразования в цементно-кремнеземистых системах, применение многокомпонентных вяжущих с регулируемой активностью, введение дисперсного армирования и химических модификаторов, а также оптимизацию технологических режимов уплотнения и твердения. Дальнейшее развитие данной области определяется необходимостью системного решения задач, связанных с получением теплоизоляционных пенобетонов, стабильно сочетающих низкую среднюю плотность с достаточным уровнем механических и деформационных характеристик.

Строительная отрасль нуждается в эффективных теплозащитных материалах, поэтому на практике используют накопленный научно-технический потенциал для решения этой задачи. Масштабы применения теплоизоляционных пенобетонов зависят от достигнутых показателей их структуры и свойств, общей динамики потребления систем теплоизоляции, соотношения основных видов утеплителей и сложившихся сфер их использования. Рыночная структура теплоизоляционных материалов показывает положение ячеистого бетона среди конкурирующих решений и перспективы расширения сферы его применения.

В России потребность в теплоизоляционных материалах проходила через периоды интенсивного роста, за которыми следовало сокращение (рисунок 1.1).

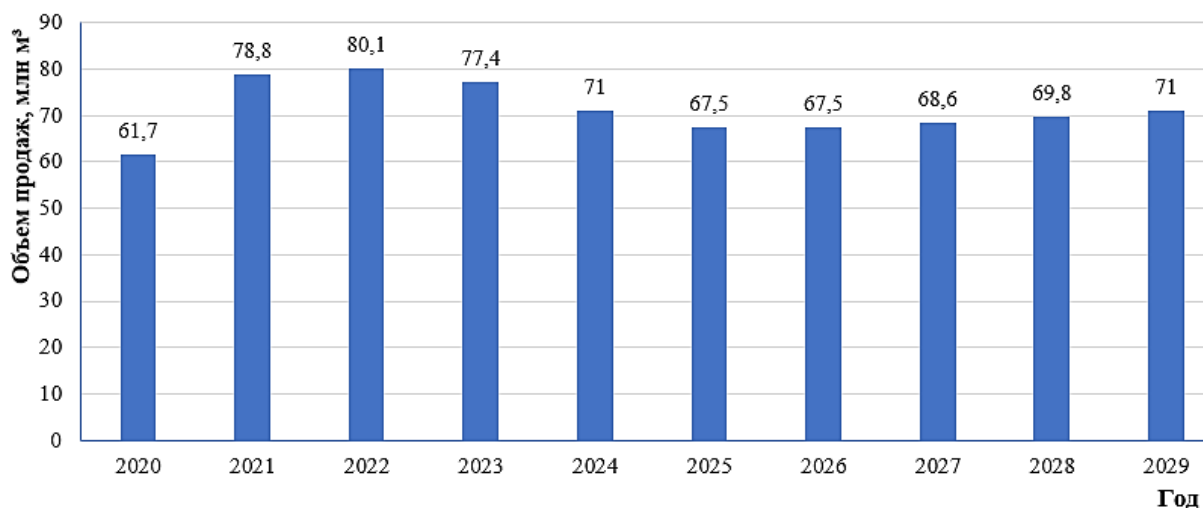


Рисунок 1.1 – Объем продаж теплоизоляционных материалов и изделий в России в период 2020–2025 гг. (прогноз до 2029 г.)

Наибольший объем продаж пришелся на 2021–2022 гг., когда активизировалось жилищное строительство, действовали программы льготного ипотечного кредитования, развивалась коммерческая и социальная инфраструктура. В 2023–2025 гг. рынок перешел к снижению. Этому способствовали удорожание заемного финансирования, завершение массовой льготной ипотеки и замедление реализации новых строительных проектов [46, 47].

Расчетный прогноз на 2026–2029 гг. предусматривает первоначальное сохранение пониженной рыночной активности с последующим постепенным восстановлением спроса [46]. Предполагаемое изменение тенденции связано с

адаптацией строительной отрасли к новым условиям финансирования, развитием индивидуального жилищного строительства, реализацией программ капитального ремонта и сохранением нормативных требований к теплозащите зданий. При этом прогнозируемый участок рисунка следует рассматривать как базовый авторский сценарий, отражающий стабилизацию рынка без возвращения к максимальному уровню потребления, достигнутому в начале рассматриваемого периода.

В структуре российского рынка теплоизоляционных изделий преобладают материалы на основе каменной и кварцевой ваты, которые применяют в фасадных, кровельных и каркасных ограждающих системах (рисунок 1.2). Полимерную теплоизоляцию составляют преимущественно вспененный и экструдированный пенополистирол, а также PIR- и PUR-изделия [48]; ими утепляют фундаменты, полы и плоские кровли. Такая структура отражает широкое применение массовых плитных утеплителей, тогда как специальные минеральные материалы занимают сравнительно небольшие рыночные сегменты [49, 50].

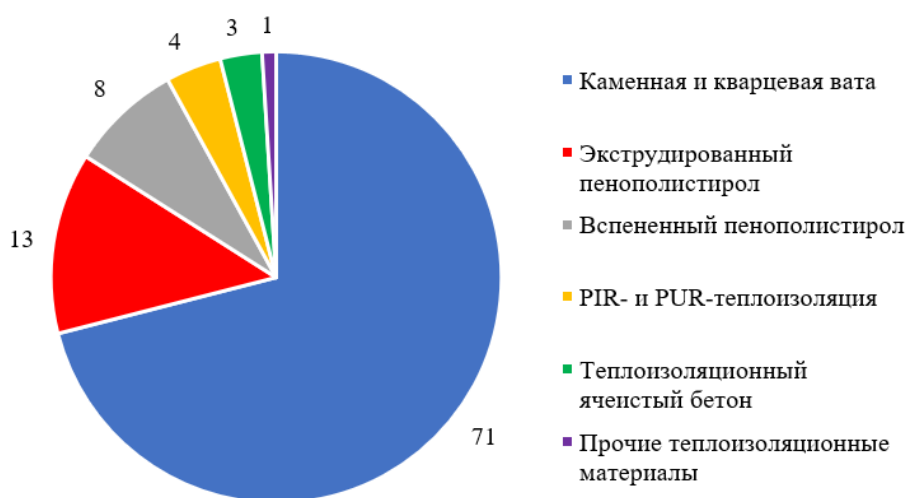


Рисунок 1.2 – Структура российского рынка теплоизоляционных материалов

Доля теплоизоляционного ячеистого бетона в структуре российского рынка составляет 3 %. При небольшом объеме сегмента ячеистые бетоны сохраняют самостоятельную область применения благодаря минеральной природе, негорючести, формоустойчивости и возможности устраивать сплошные теплоизоляционные слои. Перспективы расширения сегмента определяют общие тенденции мирового рынка ячеистых бетонов и растущий спрос на неавтоклавные

технологии, адаптированные к децентрализованному производству и применению непосредственно на строительных объектах.

Мировой рынок ячеистых бетонов на протяжении последнего десятилетия характеризуется устойчивой положительной динамикой, что связано с глобальными тенденциями увеличения объемов жилищного строительства, ужесточением требований к энергетической эффективности ограждающих конструкций, а также стремлением к снижению углеродоемкости строительной отрасли в целом. В структуре указанного рынка традиционно преобладает автоклавный ячеистый бетон, прежде всего газобетон, производство которого сконцентрировано на крупных специализированных предприятиях и ориентировано преимущественно на массовое жилищное строительство. Вместе с тем сегмент неавтоклавных материалов, в первую очередь пенобетонов, характеризуется опережающими темпами роста, что объясняется технологическими преимуществами децентрализованной организации производства. Среднегодовые темпы прироста рынка неавтоклавных ячеистых бетонов оцениваются в диапазоне до 6,5 % (рисунок 1.3) с горизонтом прогнозирования до 2030 г. [20, 21, 51, 52].

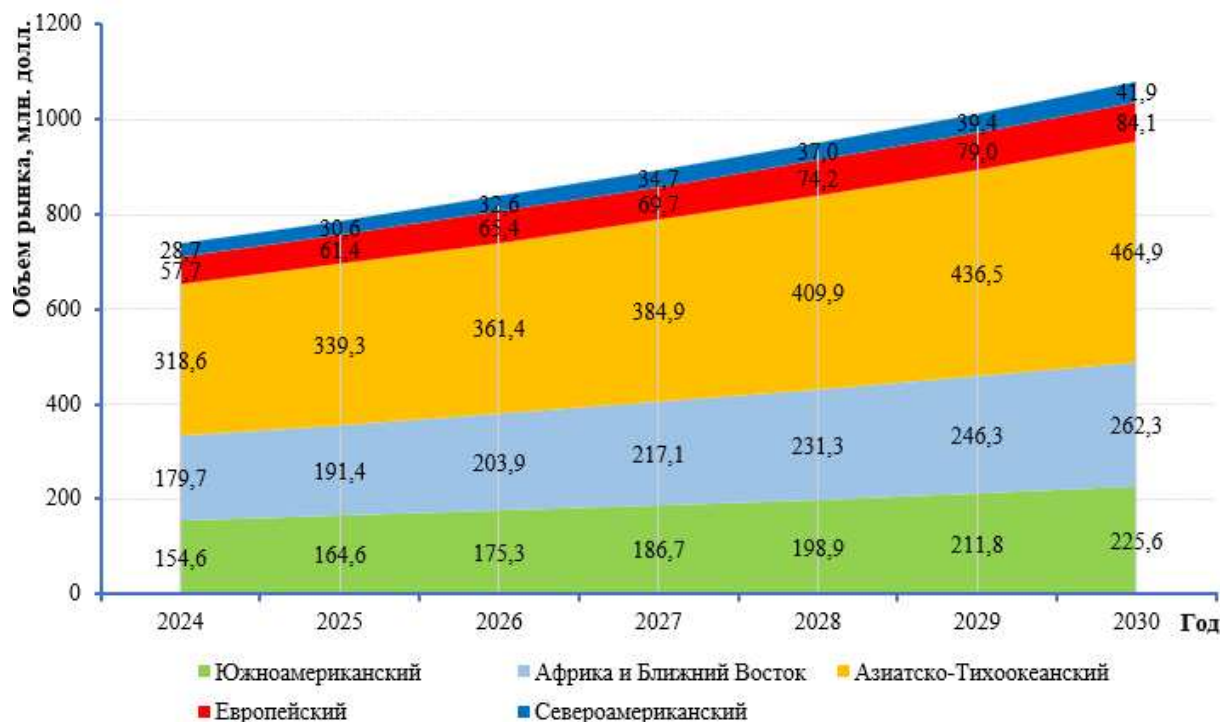


Рисунок 1.3 – Мировое производство неавтоклавных ячеистых бетонов по регионам с прогнозом до 2030 г.

Региональная структура мирового рынка ячеистых бетонов характеризуется выраженной концентрацией в Азиатско-Тихоокеанском регионе, доля которого в объеме потребления составляет от 44 до 52 % в зависимости от рассматриваемого сегмента, что обусловлено масштабными программами урбанизации в Китае, Индии и государствах Юго-Восточной Азии. Европейский рынок сохраняет устойчивое второе место в мировом рейтинге. Европейские производители исторически специализируются преимущественно на автоклавном газобетоне, тогда как неавтоклавные пенобетоны чаще выпускают в регионах с развитой инфраструктурой малотоннажных предприятий; аналитики считают рынки Северной Америки, Ближнего Востока, Африки и Латинской Америки перспективными для внедрения неавтоклавных технологий благодаря более низкому инвестиционному порогу и гибкому масштабированию производства под локальный спрос [51, 52].

Российский рынок ячеистых бетонов входит в число крупнейших в Европе, при этом его структуру определяет газобетонный сегмент. Согласно данным аналитических исследований, ячеистобетонные изделия устойчиво занимают более 80 % совокупного выпуска бетонных блоков, тогда как к 2023 г. доля газобетона в производстве штучных материалов превысила 50 %. Основной объем выпуска формируют автоклавные газобетоны, которые производят крупные специализированные заводы, а производство неавтоклавных материалов сохраняется преимущественно на малых и средних предприятиях Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, где логистические ограничения формируют конкурентные условия для локального производства. Выпуск газобетонных блоков менялся неравномерно. В 2021 г. производство выросло на 17,2 %, в 2022 г. – на 2,2 %, а общий объем за 2012–2022 гг. увеличился с 9,92 до 15,18 млн м³ [51, 52].

Тенденции развития рынков теплоизоляционных ячеистых бетонов и изделий на их основе подтверждают востребованность неавтоклавных пенобетонов как самостоятельной группы эффективных минеральных утеплителей. Их конкурентные преимущества связаны с возможностью наладить малотоннажное

производство рядом со строительными объектами, выпускать изделия и создавать теплоизоляционные материалы разной конфигурации, а также адаптировать составы к местной сырьевой базе. Поэтому актуальна разработка теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона с регулируемой пористой структурой и дисперсным армированием, которое повышает устойчивость межпоровых перегородок и эксплуатационную надежность материала. Нормативно закреплённые области применения теплоизоляционных ячеистых бетонов и действующие требования к тепловой защите зданий создают условия для использования таких материалов в строительстве.

1.2. Сырьевые компоненты неавтоклавного ячеистого бетона

Получение неавтоклавного пенобетона с заданными физико-механическими и теплофизическими характеристиками требует рационального подбора и рационализации состава сырьевых компонентов, включая вяжущее, пенообразователь и химические модифицирующие добавки [53-58]. Их природа, качество и взаимная совместимость в конечном счете определяют среднюю плотность, прочность, коэффициент теплопроводности и долговечность материала. Отечественные исследования показывают, что физико-механические свойства неавтоклавных пенобетонов зависят от вида вяжущего, качества пенообразователя, природы и дозировки модифицирующих добавок, а также от других рецептурно-технологических факторов.

1.2.1. Вяжущие для ячеистого бетона

В технологии неавтоклавного ячеистого бетона нормативно допустимые виды вяжущих охватывают широкий спектр минеральных систем: портландцемент, шлакопортландцемент, известково-шлаковое вяжущее, шлакощелочное вяжущее, а также известково-цементно-пуццолановые композиции [58]. Применение каждого из перечисленных типов вяжущих определяется конкретными технологическими задачами – регулированием сроков схватывания, управлением скоростью набора пластической прочности пеноцементной системы и обеспечением нормируемых физико-механических

показателей в соответствии с требованиями ГОСТ 25485–2019 [35]. Для теплоизоляционных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения указанным стандартом установлены классы прочности на сжатие B0,5; B0,75; B1; B1,5 при марках по средней плотности D200–D500, причем конкретный вид вяжущего оказывает определяющее влияние на достижимость данных нормируемых показателей.

Наиболее распространенным видом вяжущего для неавтоклавных пенобетонов является портландцемент, прочность цементного камня межпоровых перегородок которого определяется совокупностью взаимосвязанных факторов: водоцементным отношением, расходом вяжущего, тонкостью помола, минералогическим составом клинкера и марочной прочностью. Основную роль в формировании ранней прочности играет алит (трехкальциевый силикат – C_3S), содержание которого в клинкере составляет, как правило, 45–65 %; для производства неавтоклавного ячеистого бетона данный показатель должен быть достаточно высоким с целью обеспечения интенсивного набора ранней прочности [59–64]. Установлены рекомендации к удельной поверхности цемента: 2500–3000 $см^2/г$ для конструкционно-теплоизоляционных пенобетонов и 3000–4000 $см^2/г$ для теплоизоляционных [65]. Следует отметить, что молекулы пенообразователя адсорбируются на поверхности зерен цемента, формируя стабилизирующий слой, который замедляет гидратацию клинкерных минералов и оказывает дифференцированное влияние на скорость структурообразования пеноцементной системы [60].

В качестве альтернативы портландцементу в технологии неавтоклавных ячеистых бетонов применяются известково-шлаковые вяжущие, получаемые совместным помолом кальциевой извести-кипелки и гранулированного доменного шлака до удельной поверхности 4000–5000 $см^2/г$; при этом активность извести должна составлять не менее 70 %, количество «пережога» – не более 2 %, а скорость гашения – 5–15 мин [66–69]. Шлакощелочные вяжущие, включающие молотый доменный шлак и щелочной компонент – едкий натр или метасиликат натрия, – обеспечивают ускоренное формирование структурной прочности пенобетонного

массива, что препятствует просадке смеси в период до набора необходимой жесткости. Как известково-шлаковые, так и шлакощелочные вяжущие характеризуются иными по сравнению с бездобавочным портландцементом механизмами гидравлической активности и сроками схватывания, что обуславливает необходимость индивидуального подбора состава пенобетона для каждого вида вяжущего [67].

Среди специально разработанных вяжущих для неавтоклавных ячеистых бетонов особое место занимают вяжущие низкой водопотребности (ВНВ), получаемые методом механохимической активации портландцементного клинкера или портландцемента совместно с высокоэффективным суперпластификатором С-3 и при необходимости активной минеральной добавкой, а также тонкомолотые многокомпонентные цементы (ТМЦ) [70-73]. Характерной особенностью ВНВ является пониженное нормальное водовязущее отношение, высокая активность и уплотненная структура цементного камня с минимальным объемом капиллярных пор, что при применении в пенобетонах обеспечивает повышенную прочность межпоровых перегородок при одинаковой средней плотности по сравнению с аналогами на стандартном портландцементе [70].

Отдельное направление представляют собой композиционные вяжущие для ячеистых бетонов, в которых к основному клинкерному компоненту добавляются активные минеральные компоненты – карбонатный наполнитель в количестве 20–30 % и более – и высокоэффективные суперпластификаторы, что обеспечивает возможность регулирования сроков схватывания, воздухововлечения, деформаций при твердении, плотности и прочности ячеистого бетона в широком диапазоне. Изучение ячеистых бетонов на основе перлитового наноструктурированного вяжущего показало достижимость классов прочности В1,5–В2,5 при марке по средней плотности $D300–D500$ и коэффициенте теплопроводности $0,08–0,10$ Вт/(м·°С) [74-76]. Перспективной группой являются также ячеистые геополимербетоны на основе алюмосиликатного сырья – зол-уноса, доменного шлака, метаксаолина, – активированного щелочными растворами [77, 78].

1.2.2. Пенообразователи

Пенообразователь является ключевым компонентом технологии пенобетона, поскольку именно его вид и качество определяют морфологию поровой структуры, стабильность пенобетонной массы в период структурообразования и в конечном счете прочностные, деформативные и теплофизические свойства готового материала. В соответствии с [35] пенообразователи подразделяются на две основные группы по природе поверхностно-активного вещества (ПАВ): синтетические, полученные на основе анионных и неионогенных ПАВ (алкилсульфатов, алкилэтоксисульфатов), и протеиновые (белковые), получаемые гидролизом белоксодержащего животного или растительного сырья. По функциональному признаку пенообразователи относят к группе воздухововлекающих добавок, при этом специальные технологические требования к кратности пены и ее стойкости конкретизируются в технологической документации производителя [79].

Синтетические пенообразователи на основе анионных ПАВ отличаются стабильным химическим составом, высокой кратностью пены (20–28 при рабочей концентрации 2,0–4,0 %), значительным сроком хранения без изменения свойств и относительно невысокой стоимостью. Вместе с тем молекулы синтетических ПАВ адсорбируются на поверхности зерен цемента, образуя плотный адсорбционный слой, который тормозит гидратацию клинкерных минералов, замедляет схватывание пенобетонной смеси и снижает прочность цементного камня межпоровых перегородок вследствие уменьшения концентрации силикатных новообразований, что подтверждается методами физико-химического анализа [80, 81]. Устойчивость пены синтетических пенообразователей в растворе оценивается по коэффициенту стойкости α , удовлетворительным значением которого считается $\alpha \geq 0,80$ –0,85, тогда как для белковых пенообразователей данный коэффициент достигает $\alpha = 0,90$ –0,92 и более, что свидетельствует о значительно более высокой совместимости протеиновой пены с цементной средой [82, 83].

Белковые пенообразователи, получаемые гидролизом животного или растительного белоксодержащего сырья, при концентрации добавки менее 0,45 %

от массы цемента практически не снижают марочную прочность пенобетона и не оказывают отрицательного воздействия на кинетику твердения цементного камня. Пленки адсорбированных молекул белка на поверхности пузырьков воздуха обладают значительно более высокой механической прочностью по сравнению с пленками синтетических ПАВ, что обуславливает повышенную устойчивость пены в щелочной цементной среде и обеспечивает равномерное распределение пор в пенобетонной массе в период до начала схватывания. Кратность пены белковых пенообразователей, как правило, ниже по сравнению с синтетическими аналогами (10–20 против 20–28), а условия хранения – жестче: материал деградирует при нагреве выше 30–40 °С и теряет функциональные свойства при замораживании; применение белковых пенообразователей в сочетании с солями-стабилизаторами позволяет обеспечить нулевое водоотделение из пены за 1 ч, что соответствует требованиям технологии неавтоклавного пенобетона [84–87].

Устойчивость пенной матрицы в пенобетонной системе зависит от природы пенообразователя, pH среды вспенивания, содержания в воде ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) и солей, ускоряющих схватывание, а также от характера взаимодействия этих компонентов с молекулами ПАВ. Изменение pH существенно влияет на кратность получаемой пены и величину первичного синерезиса пенной матрицы. Выявленные закономерности связаны с константой гидролиза добавки-ускорителя.

Добавки-сульфаты в сочетании с загустителями корректируют структурную вязкость пенобетонного массива и повышают стойкость пены в щелочной среде. Это особенно важно при использовании синтетических пенообразователей в составах теплоизоляционных пенобетонов с низкой средней плотностью (марки по средней плотности $D150$ – $D300$), поскольку в таких материалах соотношение объема пены и цементного теста достигает наиболее высоких значений. Синтетические пенообразователи, отнесенные к группе воздухововлекающих добавок, требуют обязательной проверки совместимости с компонентами конкретного пенобетонного состава. Отдельные пластификаторы и суперпластификаторы изменяют поверхностное натяжение на границе раздела «вода – воздух», вследствие чего меняется поровая структура материала [88–90].

1.2.3. Модифицирующие добавки

Отечественная нормативная практика относит все модифицирующие вещества на четыре класса в зависимости от их основного функционального эффекта.

Первый класс объединяет добавки, которые регулируют свойства бетонных и растворных смесей. К нему относят пластифицирующие, в том числе суперпластифицирующие, водоредуцирующие и стабилизирующие добавки, вещества для регулирования сохраняемости подвижности, а также составы, увеличивающие воздухо(газо)содержание. В эту группу входят воздухововлекающие, газообразующие и пенообразующие добавки. При производстве неавтоклавного пенобетона последняя подгруппа выполняет основную функцию, поскольку с ее помощью воздух вовлекается в ячеистобетонные смеси в пределах от 15 до 90 %.

Второй класс включает добавки, которые регулируют свойства уже сформированных бетонов и растворов. К ним относят ускорители и замедлители твердения, составы для повышения прочности, снижения проницаемости, защиты стальной арматуры, повышения морозостойкости и коррозионной стойкости, а также расширяющие добавки.

В третий класс входят вещества, придающие материалу специальные свойства. К ним относят противоморозные, гидрофобизирующие и фотокаталитические добавки.

Четвертый класс включает минеральные добавки двух типов. Активные минеральные добавки обладают вяжущими свойствами, пуццолановой активностью или сочетанием этих признаков. Инертные минеральные добавки химически не взаимодействуют с компонентами цементной системы. Эффективность добавок всех перечисленных классов определяют по ГОСТ 30459–2008 [91]. Рациональной считают дозировку, при которой минимальное количество добавки обеспечивает нормируемый технологический и (или) технический эффект без недопустимого ухудшения других показателей качества смесей, бетонов и растворов.

Пластифицирующие добавки используются в технологии неавтоклавного пенобетона с целью снижения водоцементного отношения при сохранении неизменной подвижности пенобетонной смеси либо, как вариант, для повышения подвижности смеси при постоянном значении В/Ц, что в обоих случаях оказывает непосредственное влияние на плотность и прочность цементного камня межпоровых перегородок. Суперпластификатор С-3 (конденсат нафталинсульфокислоты с формальдегидом) относится к суперпластифицирующим добавкам, молекулы которого несут отрицательный заряд и адсорбируются на поверхности частиц цемента, создавая электростатическое отталкивание (ζ -потенциал), за счет чего при дозировке 0,4–0,8 % от массы цемента достигается снижение водопотребности смеси на 10–25 % и прирост прочности цементного камня на 20–40 % при 28-суточном твердении [92, 93]. Гиперпластификаторы поликарбоксилатной основы (Elocrete, Melflux, MC-PowerFlow и их аналоги) действуют преимущественно через стерический механизм – длинные полиэфирные боковые цепи, привитые к основной молекуле, создают пространственный барьер, препятствующий сближению частиц цемента и обеспечивающий устойчивый разжижающий эффект при дозировке 0,1–1,0 % от массы твердых веществ с водоредукцией свыше 20 % [94].

Стабилизирующие добавки, обеспечивающие снижение водоотделения и раство́роотделения пенобетонной смеси в 2 раза и более, являются определяющими для неавтоклавного пенобетона сверхнизкой плотности ($D_{150}–D_{300}$), поскольку высокое объемное соотношение пены и цементного теста (до 7:1 и более) закономерно провоцирует ускоренный синерезис пены еще в период транспортирования и укладки смеси [95]. К стабилизирующим добавкам, применяемым в рецептурах пенобетона, относятся эфиры целлюлозы – метилгидроксипропилцеллюлоза и метилгидроксиэтилцеллюлоза: при концентрации 0,1–0,5 % от массы вяжущего они повышают вязкость жидкой фазы, переводя свободную воду в связанное состояние, подавляя синерезис пены, повышая пластическую прочность массива на ранней стадии структурообразования и обеспечивая водоудержание, необходимое для полноты гидратации вяжущего в тонких межпоровых перегородках. Ускорители

твердения – сульфат натрия Na_2SO_4 в дозировке 1,5–2,0 %, сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в дозировке 0,5–2,0 % и нитрат кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ в дозировке 1,0–2,0 % от массы цемента – обеспечивают прирост прочности на 30 % и более в возрасте 1 сут нормального твердения, что особенно важно для неавтоклавного пенобетона, у которого ранняя прочность определяет сохранность пористой структуры в период до набора критической структурной прочности, достаточной для извлечения изделия из формы [96].

Гидрофобизирующие добавки (критерий эффективности – снижение водопоглощения в 2 раза и более) применяются для неавтоклавного пенобетона, открытая и сообщающаяся пористость которого является закономерным структурным свойством данной группы материалов и обуславливает высокое капиллярное водопоглощение и пониженную морозостойкость [97-99]. Механизм действия гидрофобизирующих добавок основан на формировании монослоя или полимолекулярной пленки молекул органосилоксанов, жирных кислот или их солей – стеаратов кальция и цинка – на поверхности порового пространства цементного камня, что переводит поровую поверхность из гидрофильного в гидрофобное состояние, увеличивая краевой угол смачивания свыше 90° и тем самым блокируя капиллярное поднятие воды без кольматации пор. Введение стеарата кальция в дозировке 0,1–0,3 % от массы цемента обеспечивает снижение водопоглощения неавтоклавного пенобетона по массе, однако сопровождается замедлением схватывания и некоторым снижением ранней прочности [97], что требует коррекции рецептуры путем совместного применения ускорителя твердения в дозировке, нормируемой в соответствии с [79].

Активные минеральные добавки, обладающие пуццолановой активностью, применяются в качестве частичного заменителя портландцемента и/или ультрадисперсного наполнителя в составах неавтоклавного пенобетона. Их введение обеспечивает химическое связывание гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция C-S-H, уплотняющих микроструктуру межпоровых перегородок [100, 101]. Зола-уноса ТЭС кислых марок, нормируемая по ГОСТ 25818–2017 [102], в количестве 20–30 % от

массы вяжущего улучшает агрегативную устойчивость пенобетонной смеси за счет высокой сферичности частиц, снижает удельный расход клинкерного вяжущего и теплоту гидратации, что уменьшает температурный градиент в период твердения и тем самым способствует снижению трещинообразования в пенобетонном массиве; при этом введение мелкодисперсных зол-уноса улучшает удобоукладываемость смеси и механическую устойчивость пенной матрицы [103, 104].

1.3. Дисперсное армирование как способ управления структурой и свойствами ячеистых бетонов неавтоклавного твердения

Одним из наиболее эффективных направлений повышения физико-механических характеристик ячеистых бетонов является дисперсное армирование – технологический прием, при котором в бетонную смесь в процессе приготовления вводятся хаотично ориентированные короткие волокна фибры, равномерно распределяемые по всему объему матрицы [105-108]. В отличие от традиционного стержневого армирования, работающего лишь в заданных плоскостях и эффективного главным образом при действии расчетных усилий, дисперсная арматура формирует объемный микрокаркас, обеспечивающий трехмерное распределение нагрузки и активное сопротивление развитию трещин в любом направлении [109, 110].

Фундаментальной предпосылкой дисперсного армирования как способа управления структурой матрицы служит классическая концепция механики разрушения, в рамках которой трещина распространяется путем концентрации напряжений у своего фронта, а торможение этого процесса достигается созданием структурных барьеров из компонента с более высоким модулем упругости. В дисперсно-армированном ячеистом бетоне пространственный армирующий каркас, формируемый хаотично ориентированными волокнами, реализует именно эту функцию: когда растущая трещина пересекает волокно, оба конца которого защемлены в матрице, в устье трещины возникает поле напряжений противоположного знака, тормозящее ее дальнейшее раскрытие [107, 108, 111].

Ключевым практическим следствием пространственного фиброкаркаса применительно к неавтоклавному пенобетону является принципиальное снижение

усадочного трещинообразования – явления, обусловленного значительными капиллярными напряжениями при испарении воды из высокопористой матрицы в процессе твердения. Механизм данного эффекта двоякий: с одной стороны, волокна функционируют как микроарматура, воспринимающая растягивающие напряжения, возникающие при стесненной усадке в период пластической прочности – когда цементный камень еще не набрал прочность, достаточную для самостоятельного противостояния усадочным деформациям; с другой стороны, введение полипропиленовых, базальтовых или стеклянных волокон в количестве 0,1–1,0 % от массы вяжущего снижает усадочные деформации неавтоклавного фибропенобетона по сравнению с неармированным составом, причем наиболее эффективными по данному показателю являются высокомодульные базальтовые волокна [112-115].

Помимо механической функции армирующего каркаса, волокна фибры оказывают существенное влияние на агрегативную устойчивость пеносмеси на стадии формирования ячеистой структуры – явления, во многом определяющего конечную однородность порового пространства и, следовательно, теплоизоляционные и механические характеристики затвердевшего материала. Волокна, равномерно распределенные в объеме цементно-пенной суспензии, создают развитую сеть межволоконных взаимодействий, повышающую вязкость и предельное напряжение сдвига системы, что снижает коалесценцию воздушных пузырьков и препятствует их слиянию в крупные неравномерные поры [116, 117].

Классификация армирующих волокон представлена на рисунке 1.4.

Использование синтетических и натуральных волокон (стеклянных и углеродных) в дисперсно-армированном пенобетоне показывает улучшенные параметры долговечности с уменьшенной усадкой при твердении, высоким модулем упругости и повышенной механической прочностью. При этом выявлено, что основным целевым критерием дисперсно-армированного пенобетона является его средняя плотность, поэтому большинство исследований направлены на изучение влияния волокон на плотность [118], про этом имеет прочность на растяжение и сжатие через 28 сут не более 2,5 МПа и 50 МПа соответственно [119].

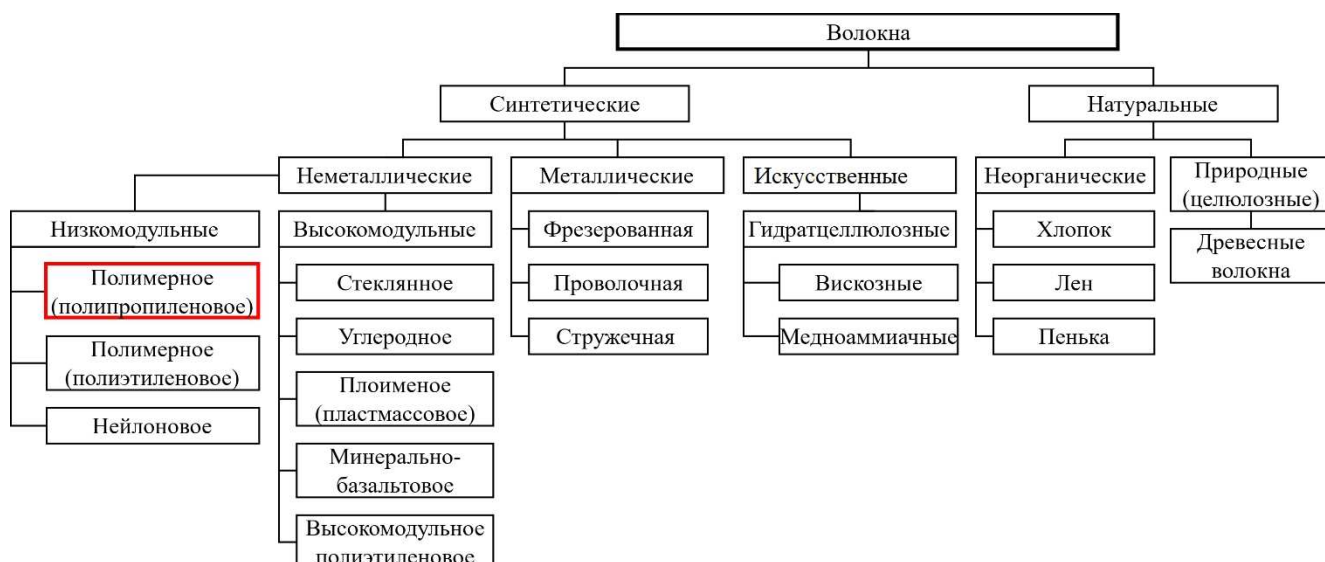


Рисунок 1.4 – Классификация армирующих волокон

Некоторые виды волокон, применяемых при производстве пенобетона, отличаются высокой стойкостью к ударным нагрузкам, истиранию и разрушению. При определенных условиях стальные либо синтетические волокна увеличенной длины полностью заменяют традиционную арматуру или стальные элементы [120]. Структура дисперсно-армированного пенобетона при этом существенно меняется в зависимости от вида бетонной матрицы, волокнистого материала, геометрических параметров волокон, характера их распределения и ориентации, а также от плотности армирования.

Хлопковое волокно, которое получают измельчением отходов хлопчатобумажной одежды, содержит 88–96 % целлюлозы и относится к наиболее легким видам волокна. Его средняя плотность составляет 1,3–1,6 г/см³, благодаря чему материал рассматривают в качестве перспективного дисперсного армирующего компонента пенобетона. Указанный диапазон сопоставим с техническими характеристиками хлопкового волокна, приведенными в специализированных источниках, где для него указана плотность 1,5–1,54 г/см³. Предел прочности при растяжении 300–600 МПа, модуль упругости 6–13 ГПа и относительное удлинение при разрыве 6–10 % позволяют рассматривать этот вторичный ресурс как перспективный материал для снижения техногенной нагрузки на окружающую среду и создания эффективных строительных композитов [121–123].

Стальная фибра остается наиболее распространенным видом дисперсного армирования благодаря высокой долговечности и широкому применению в строительной отрасли. В пенобетоне ее используют в виде отрезков низкоуглеродистой стальной проволоки диаметром 0,7–1,2 мм и длиной 25–60 мм [124].

Нейлоновое волокно входит в число наиболее массовых синтетических волокон, которые производят и используют в быту и промышленности. Оно отличается высокой стойкостью к истиранию и износу, хорошей эластичностью, низким коэффициентом трения и значительной ударной вязкостью, а также огнестойкостью и благоприятными характеристиками при растяжении. Кроме того, нейлон обладает повышенной способностью поглощать воду, хорошо противостоит воздействию ряда растворителей и демонстрирует высокие электроизоляционные свойства [125].

Полиакрилонитрильное (ПАН), или акриловое, волокно относится к армирующим материалам с одним из наиболее высоких модулей упругости, достигающим 14–25 ГПа и сопоставимым по величине с модулем упругости цементной матрицы [126]. Указанные нановолокна выпускаются с диаметром порядка 0,5–1,5 мкм и менее, что обеспечивает формирование мелкодисперсной армирующей системы в цементном камне.

Эксплуатационные характеристики углеродных волокон в значительной мере определяются структурой графитовых кристаллитов в их микроструктуре. Хорошо известные нановолокна семейства фуллеренов представлены углеродными нанотрубками, которые можно рассматривать как свернутые в цилиндр графеновые листы, формирующие трубчатые структуры с чрезвычайно высоким коэффициентом удлинения (отношением длины к диаметру), превышающим 1000 [127]. Различные типы нанотрубок характеризуются пределом прочности при растяжении в диапазоне 11–63 ГПа и очень высоким модулем упругости порядка 1000–1800 ГПа, что подтверждается экспериментальными и теоретическими данными по механическим свойствам углеродных нанотрубок.

Полипропиленовое волокно относится к числу наиболее распространенных материалов для дисперсного армирования цементных композитов, включая теплоизоляционные неавтоклавные пенобетоны. Его производят из термопластичного полипропилена в виде коротких монофиламентных или фибриллированных волокон. Благодаря низкой средней плотности полипропиленовой фибры ее добавление в цементную смесь практически не увеличивает среднюю плотность пенобетона, сохраняя его теплоизоляционную эффективность. Для волокон, применяемых в цементных композитах, указывают плотность 0,90–0,91 г/см³, прочность при растяжении около 400–700 МПа, модуль упругости от 3,5 до 8,0 ГПа и относительное удлинение при разрыве 10–25 %. При производстве пенобетона обычно используют фибру длиной 6–12 мм, реже – 18 мм и более. Диаметр тонкой монофиламентной фибры, как правило, составляет 20–40 мкм, хотя точные параметры зависят от марки и способа изготовления материала [111, 114].

Полипропиленовое волокно устойчиво к щелочной среде цементного камня, коррозии и увлажнению, а также обладает низкой теплопроводностью. Оно не подвержено электрохимической коррозии, характерной для металлической фибры. Природные целлюлозосодержащие волокна склонны к биологическому разрушению и существенному увлажнению; полипропиленовое волокно устойчиво к этим воздействиям [114].

Высокая деформативность полипропиленового волокна при растяжении делает его особенно эффективным на ранних стадиях структурообразования цементной системы. При пластической деформации и ранней усадке волокна перераспределяют локальные растягивающие напряжения, сдерживают раскрытие зарождающихся микротрещин и повышают связность еще неокрепшей пенобетонной матрицы. В производстве теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения используется полипропиленовая фибра с малой массой, химической стойкостью и технологической доступностью.

1.4. Повышение эффективности теплоизоляционных дисперсно-армированных ячеистых бетонов

При дисперсном армировании пенобетона пониженной плотности принципиально важно подобрать рациональную рецептурную основу с вяжущими компонентами различной активности и комплексом полифункциональных модифицирующих добавок. В состав комплекса входят пенообразователи, пластификаторы и ускорители гидратации. Они регулируют реотехнические параметры суспензии, поддерживают седиментационную устойчивость волокна в объеме пенобетонной смеси и обеспечивают его равномерное распределение в затвердевшей матрице. Направленное воздействие этих добавок на гетерофазную систему определяет конечные макромеханические характеристики материала, включая прочность на сжатие и растяжение при изгибе, а также формирует топологию порового пространства.

Теоретическое описание устойчивости газожидкостной дисперсной системы опирается на положения коллоидной химии [128, 129]. Адсорбционные слои поверхностно-активных веществ на границе «жидкость – газ» снижают межфазное натяжение и создают структурно-механический барьер, препятствующий сближению и слиянию пузырьков. Состояние межпузырьковых жидких пленок зависит от соотношения капиллярного давления, Ван-дер-Ваальсова притяжения и электростатического отталкивания, которое создают диффузные двойные электрические слои. Уменьшение результирующего расклинивающего давления ускоряет истончение пленки, приводит к ее разрыву и коалесценции соседних газовых полостей [130, 131].

В цементной суспензии кинетика этих процессов зависит также от вязкости и концентрации твердой дисперсной фазы. Повышение эффективной вязкости замедляет дренирование жидких пленок и диффузионно-конвективный перенос вещества, тогда как при росте объемной концентрации частиц необходимо учитывать их гидродинамическое взаимодействие [132–134]. Устойчивость поровой структуры свежеприготовленной пенобетонной смеси поддерживается согласованным регулированием поверхностной активности пенообразователя,

электростатических и структурно-механических свойств адсорбционных слоев, вязкости цементной суспензии и дисперсности твердой фазы. Это ограничивает коалесценцию пузырьков до формирования жесткого каркаса цементного камня.

Ключевым рецептурным фактором, определяющим прочностные характеристики теплоизоляционного пенобетона при заданной плотности, является тип и состав вяжущего. Применение портландцемента в качестве единственного вяжущего компонента вследствие значительного выделения Ca(OH)_2 в ходе гидратации C_3S и C_2S формирует крупнокристаллическую структуру цементного камня с пониженной прочностью межпоровых перегородок; введение же пуццолановых добавок обеспечивает вторичное связывание гидроксида кальция с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H, уплотняющих микроструктуру матрицы [135-138]. Особая роль в данном отношении принадлежит тонкодисперсным многокомпонентным вяжущим на основе совместного помола портландцемента с молотым доменным гранулированным шлаком, при рациональных составах обеспечивающим снижение расхода клинкерного компонента до 30–50 % при сохранении нормируемых прочностных классов [139]. Установлено, что бесклинкерные и малоклинкерные вяжущие с молотым доменным гранулированным шлаком характеризуются замедленным набором прочности в ранние сроки, что компенсируется применением ускорителей схватывания – жидкого стекла (силиката натрия), хлоридов кальция или натрия, сульфата натрия – в количестве 0,5–3,0 % от массы вяжущего [140].

При неизменной плотности пенобетона снижение водоцементного отношения (В/Ц) используют как один из главных способов управлять прочностью межпоровых перегородок. Для поризации пенобетонной смеси требуется достаточная реология, поэтому в пенобетонной смеси сохраняется повышенное содержание воды. Избыток воды формирует в цементном камне капиллярную пористость и усиливает влажностную усадку, которая у неармированных пенобетонов достигает значений 1,5–3,0 мм/м [141]. Суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров в типовых рецептурах пенобетона марок по средней плотности $D400$ – $D600$ снижают В/Ц при условии, что пена сохраняет

устойчивость. В теплоизоляционных пенобетонах марок по средней плотности $D300$ и ниже применяют пластификаторы умеренного действия, в частности нафталинсульфонатный суперпластификатор С-3 и лигносульфонаты, при концентрации добавок 0,5–1,0 % от массы цемента [142, 143]. Рационально подобранное водоцементное отношение в сочетании с пуццолановыми добавками и пластифицирующей добавкой с умеренным водоредуцирующим эффектом позволяет получать теплоизоляционный пенобетон марок по средней плотности $D300$ – $D400$, который характеризуется прочностью на сжатие 0,8–1,5 МПа, морозостойкостью F25–F35 и коэффициентом теплопроводности 0,09–0,12 Вт/(м·°C) в условиях эксплуатационного увлажнения [144, 145].

Тип применяемого пенообразователя оказывает определяющее влияние на формирование пористой структуры пенобетона и, через нее, на его физико-механические и теплофизические характеристики. Протеиновые пенообразователи, получаемые гидролитической переработкой кератинсодержащего белкового сырья (копытно-рогового, кровяного и др.), обеспечивают образование преимущественно сферических изолированных пор с тонкими, бездефектными межпоровыми перегородками; при этом, согласно результатам сопоставительных исследований, пенобетон на основе протеинового пенообразователя демонстрирует более высокую прочность и более благоприятную морфологию порового пространства по сравнению с материалом, полученным с использованием синтетического аналога [146]. Синтетические ПАВ-пенообразователи характеризуются повышенной пенообразующей способностью и меньшей себестоимостью, однако при плотности ниже 300 кг/м³ они существенно замедляют гидратацию клинкерных минералов вследствие адсорбционного покрытия поверхности цементных зерен, что приводит к задержке структурообразования и снижению прочности пенобетона относительно составов на протеиновой основе. Применение комбинированных пенообразователей – совмещения протеинового пенообразователя с ускорителями твердения – позволяет одновременно сохранить мелкочаистую структуру и обеспечить нормируемые сроки схватывания для пенобетона марки по средней плотности

D300 [147, 148]. Таким образом, рациональный выбор типа пенообразователя в совокупности с рационализацией В/Ц, состава вяжущего и минеральных добавок позволяет обеспечить комплексное повышение эффективности теплоизоляционного пенобетона без увеличения его объемной массы.

Наиболее обширный массив экспериментальных данных о влиянии дисперсного армирования на механические свойства пенобетонов накоплен для полипропиленовой фибры ввиду ее доступности, щелочестойкости и относительно невысокой стоимости. Результаты экспериментальных исследований показали, что введение полипропиленовой фибры длиной 12–18 мм в дозировке 0,3–1,3 кг/м³ коррелирует с повышением прочности затвердевшего пенобетона средней и повышенной плотности на 10–40 % относительно неармированного аналога [149, 150]. В составах марок по средней плотности *D600–D800* при оптимальном содержании фибры прочность на сжатие возрастает на 20–55 %. Полученные значения согласуются с данными независимых экспериментальных работ. Для теплоизоляционных пенобетонов марок по средней плотности *D200–D400* влияние полипропиленовой фибры выражено слабее. Существенная часть наблюдаемого эффекта связана со стабилизацией пенобетонной смеси, тогда как вклад армирования матрицы в строгом механическом смысле остается ограниченным. При этом исследования зафиксировали повышение прочности теплоизоляционных составов на растяжение при изгибе на 15–40 % при объемном содержании полипропиленовой фибры 0,25–0,50 % [151–154].

Армирование пенобетонов базальтовыми волокнами обнаруживает выраженный комплексный эффект, охватывающий прочностные, деформационные и теплофизические характеристики одновременно. В ходе экспериментального исследования с равномерным распределением базальтовых волокон в пенобетонной смеси установлено, что прочность на сжатие в 28-суточном возрасте возрастала с 1,80 МПа у неармированного образца до 2,65 МПа при оптимальном содержании фибры, что составляет прирост около 47 %, а прочность при изгибе увеличилась с 1,15 до 1,80 МПа [155]. Одновременно базальтовое волокно, вводимое совместно с микрокремнеземом в количестве до 1,0 % по объему,

обеспечивало снижение сорбционной влажности межпоровых перегородок вследствие уплотнения контактной зоны «волокно–матрица», что приводило к снижению коэффициента теплопроводности в условиях эксплуатации. Результаты работы показали, что совместное применение базальтовой фибры в дозировке 1,0 % по объему с микрокремнеземом обеспечивает получение конструкционного пенобетона с прочностью на сжатие порядка 4,6 МПа, прочностью при изгибе 0,69 МПа и повышенной стойкостью к циклам замораживания–оттаивания [156].

Особое место среди видов фибры, используемой в пенобетонной технологии, занимают поливинилспиртовые (PVA) волокна, которым свойственны высокий модуль упругости (29–40 ГПа), значительное относительное удлинение при разрыве (6–8 %) и хорошая совместимость с щелочной цементной матрицей. Экспериментальные данные свидетельствуют, что при массовом содержании PVA-волокон 0,25 % прочность на сжатие пенобетонной матрицы возрастает на 154 % по сравнению с контрольным составом без дисперсного армирования; в то же время при введении полипропиленовых волокон в аналогичной массовой доле 0,25 % ударная прочность пенобетона увеличивается на 300 % [157].

Применение PVA-волокон в сочетании с золой-уносом в монолитном пенобетоне показало, что волокна формируют пространственную сетчатую структуру между пузырьками пены, препятствуя их коалесценции и разрушению [158, 159]. При изгибных нагрузках высокая адгезия PVA-волокон к цементной матрице вызывает преждевременный разрыв волокон до того, как они достигают стадии выдергивания. Из-за этого нагрузка перераспределяется по объему композита менее равномерно. Водоотталкивающие составы, которыми обрабатывают волокна, уменьшают частоту такого разрыва, и по данным специализированных испытаний вязкость разрушения пенобетона при изгибе повышается на 20,8 %. PVA-фибра наиболее эффективна в пенобетонах марок по средней плотности *D600–D800*, когда состав ориентирован на повышение ударной прочности и трещиностойкости. При такой плотности высокая адгезия волокон и их модуль упругости проявляются без критического нарушения устойчивости структуры. В теплоизоляционных составах пониженной плотности (марок по

средней плотности $D300$ – $D400$) применяют пониженные дозировки PVA-волокон, поскольку они предотвращают дестабилизацию пористой структуры и сохраняют требуемый уровень плотности и теплозащитные характеристики материала [160].

Экспериментальные данные, приведенные в работе [161], показывают, что теплоизоляционный фибропенобетон естественного твердения при содержании синтетической фибры достигает марки по морозостойкости F50–F100, причем значение зависит от средней плотности материала и типа применяемых волокон. У пенобетона той же плотности без армирования этот показатель находится в пределах F25–F35.

Сопоставление экспериментальных данных, полученных для различных видов дисперсного армирования, показывает, что наибольший вклад в повышение прочности на сжатие пенобетонов средней плотности вносят PVA-волокна [162]. При массовом содержании около 0,25 % они обеспечивают прирост прочности до 150 % по сравнению с неармированным контролем. Следующими по эффективности идут базальтовые волокна, которые при объемном содержании 0,3–1,0 % повышают прочность конструктивных составов на 30–56 %, и полипропиленовые волокна, применение которых при дозировках 0,3–1,3 кг/м³ дает прирост прочности в пределах 10–40 %. По критерию морозостойкости наиболее стабильный результат фиксируется при применении полипропиленовых и полипропилен/базальтовых гибридных составов ввиду их дополнительного воздухововлекающего эффекта. С точки зрения влияния на теплопроводность пенобетона введение любого вида фибры при умеренных дозировках – до 1,0–1,2 кг/м³ для полипропиленовых волокон, до 0,5–0,7 % по объему для базальтовых и PVA-волокон – либо снижает, либо не увеличивает коэффициент теплопроводности за счет снижения сорбционной влажности матрицы, тогда как превышение оптимальных дозировок ведет к нарушению поровой структуры и росту теплопроводности [162].

Физическая сущность влияния дисперсного армирования на пористую структуру пенобетона определяется двумя взаимосвязанными механизмами: механическим армированием пенных пленок в свежееуложенной смеси и ускорением

формирования структурной прочности межпоровых перегородок в период их структурообразования. Согласно гипотезе, применительно к энергетическому потенциалу фибры в пенобетонных смесях [163-166], волокна, введенные в пенобетонную смесь, выполняют роль центров структурирования, ускоряющих формирование пространственного каркаса в межпоровых перегородках и повышающих однородность их сечения по сравнению с неармированным аналогом. Скорость нарастания пластической прочности пенобетонной смеси при этом существенно возрастает, а период уязвимости поровой структуры к флотационным и коалесцентным процессам сокращается, что в конечном счете обуславливает сохранение целостности пузырьков и формирование более равномерного распределения пор в затвердевшем материале. Одновременно волокна, обладающие развитой удельной поверхностью, участвуют в перераспределении жидкой фазы пены, снижая локальные концентрации ПАВ в межчастичной воде пенных пленок, что уменьшает движущую силу разрыва перегородок при ранней усадке на начальной стадии твердения. Итогом совокупного действия указанных механизмов является формирование межпоровых перегородок повышенной плотности с уменьшенным объемом капиллярных пор [166].

Экспериментальное исследование параметров пористой структуры методами компьютерной томографии и обработки СЭМ-изображений позволило количественно охарактеризовать трансформацию поровой архитектуры при введении различных видов фибры. Установлено, что при добавлении стеклянных, РВА- и полипропиленовых волокон с массовой долей 1 % доля пор диаметром менее 400 мкм возрастает; пенобетоны со стеклянными волокнами обнаруживали увеличение округлости пузырьков и уменьшение коэффициента вариации их диаметра, тогда как у контрольных образцов наблюдалось значительное число слившихся и деформированных пор. Вместе с тем при увеличении массовой доли фибры сверх оптимального значения (1,0–1,5 %) средний диаметр пор возрастал вследствие нарушения агрегативной устойчивости пены под механическим воздействием волокон на пленочные перегородки при перемешивании. Для теплоизоляционных пенобетонов марок по средней плотности $D300$ – $D400$,

формируемых с кратностью пены 10–15, критическая дозировка волокна, не вызывающая деструкции поровой структуры, составляет по данным ряда исследований не более 0,3–0,6 % по объему для базальтовых и PVA-волокон и не более 0,8–1,2 кг/м³ для полипропиленовых волокон [167]. Таким образом, рационализация дозировки и морфологии волокна является необходимым условием целенаправленного управления пористой структурой теплоизоляционного пенобетона посредством дисперсного армирования.

Равномерность распределения пор по объему пенобетона является самостоятельным структурным показателем, оказывающим определяющее влияние на однородность прочностных и теплофизических свойств материала. В исследовании, посвященном сравнительной эффективности технологий изготовления пенобетона по классической схеме и с двухстадийным введением пены, установлено, что в образцах по двухстадийной схеме коэффициент вариации прочности на сжатие при 28-суточном твердении снижается с 8,83 до 3,58 %, что свидетельствует о существенно более высокой однородности порового пространства при усовершенствованной технологии. Введение фибры в сочетании с технологически рациональным порядком смешения компонентов значительно усиливает данный эффект, поскольку волокна физически препятствуют всплытию крупных воздушных пузырьков и их концентрации в верхних зонах формы – главной причине структурной неоднородности неармированного пенобетона [168]. По данным рентгеновской компьютерной томографии пенобетонных образцов, армированные составы демонстрируют уменьшение доли пор диаметром более 1 мм, повышение доли изолированных сферических ячеек диаметром менее 400–600 мкм и снижение коэффициента вариации их диаметра по объему образца. При дисперсном армировании поровая структура пенобетона становится более упорядоченной, прочностные характеристики повышаются, коэффициент теплопроводности в условиях эксплуатации становится более стабильным и предсказуемым, поскольку влагонасыщение более однородной и мелкопористой структуры протекает менее интенсивно [169].

Критическая длина волокна l_c задает границу между режимами разрушения «выдергивание» и «разрыв» и характеризует эффективность передачи нагрузки от матрицы к волокну. Классическая теория армированных цементных композитов связывает эту величину с соотношением $l_c = \sigma_f d / (2\tau)$, где σ_f – предел прочности волокна при растяжении; τ – напряжение сдвига на границе «волокно–матрица». В пористой матрице пенобетона значительно ниже, чем в тяжелом бетоне. Поэтому для одной и той же пары «волокно–вяжущее» значение l_c возрастает. Эксперименты показывают, что для полиолефиновых волокон в плотных цементных матрицах критическая длина составляет примерно 10–25 мм, причем конкретное значение зависит от состояния поверхности и характера адгезии. В пенобетоне сцепление волокна с матрицей слабее, поэтому критическая длина увеличивается. Этим объясняется более высокая эффективность относительно длинных волокон размером 12–18 мм по сравнению с микроволокнами длиной 3–6 мм в теплоизоляционных пенобетонах. Критическую длину используют при обосновании рационального аспектного отношения l/d . Для полипропиленовых волокон в теплоизоляционных пенобетонах оптимальным считают аспектное отношение в диапазоне 150–600. При превышении этого значения волокна комкуются, вследствие чего нарушается однородность дисперсного армирования пенобетона [170, 171]. Пористая структура пенобетона создает условия для пересечения отдельными волокнами межпоровых перегородок, которые связывают соседние несущие элементы матрицы. При вырывании такого волокна из перегородки затрачивается значительно меньше энергии, чем при его вырывании из монолитного цементного камня. Поэтому расчет энергоемкости разрушения пенобетона требует специальной оценки работы вырыва волокон из межпоровых перегородок.

Пространственная ориентация волокон в объеме пенобетона относится к третьему ключевому параметру, который наряду с адгезией волокон к цементной матрице и их критической длиной определяет эффективность дисперсного армирования. В конструктивных бетонах направление расположения фибры во

многих случаях задается технологией. При вибрировании, экструзии и трехмерной печати волокна перемещаются преимущественно вдоль потока смеси, поэтому армирование приобретает анизотропный характер и усиливает материал по заданному направлению. В пенобетонных смесях складывается иная картина. Сниженная вязкость системы, сочетающаяся с активным выделением газа в процессе порообразования, препятствует устойчивому формированию заданной ориентации волокон, которые распределяются в объеме преимущественно хаотично и образуют изотропную трехмерную структуру. Такой характер армирования не создает выраженного направленного эффекта, зато выравнивает трещиностойкость материала при различных направлениях нагружения.

Структура дисперсно-армированных пенобетонов показывает, как природа волокон влияет на параметры контактной зоны «волокно–цементный камень» и объемное распределение фибры в матрице. При аналогичных технологических условиях стеклянные волокна распределяются в цементной матрице равномернее ряда синтетических волокон, формируя случайно ориентированную пространственную сеть, которая эффективно препятствует развитию трещин, повышает прочность и улучшает трещиностойкость материала. Характер распределения фибры прямо отражается на коэффициенте вариации прочностных показателей по сечению. Чем равномернее волокна диспергированы в объеме пенобетона, тем ниже разброс прочности, тем более воспроизводимы показатели механического поведения материала при нагрузке в разных направлениях [156].

При дозировках свыше 0,5 % по объему главным препятствием для равномерной дисперсии базальтовой фибры в матрице служит комкование волокон, возникающее при смешении с пенобетонной смесью. В воде затворения волокна предварительно диспергируют, при приготовлении смеси ограничивают продолжительность перемешивания, благодаря чему выраженность комкования снижается. Прочность пенобетона на сжатие возрастает на 30–40 % по сравнению с неармированным аналогом [107]. В свежееуложенной пенобетонной смеси волокна, располагаясь между пузырьками пены, выполняют роль пространственного каркаса, который ограничивает миграцию пузырьков и

сдерживает коалесценцию крупных пор. Так проявляются технологический и структурный эффекты армирования. Действие волокон напрямую связано с их ориентацией и дозировкой.

Гибридное армирование объединяет два и более вида фибры, различающихся геометрией и модулем упругости. Такой подход рассматривают как перспективное направление оптимизации состава дисперсно-армированных пенобетонов, поскольку он создает синергетический эффект и одновременно сдерживает развитие микро- и макротрещин. Теоретическая основа гибридного эффекта состоит в том, что тонкие волокна (диаметром до 20 мкм) снижают развитие микротрещин при усадке в ранние сроки твердения, тогда как более грубые волокна (диаметром 30–50 мкм) препятствуют раскрытию магистральных трещин при нагружении; оба класса волокон взаимно дополняют друг друга при формировании итоговой трещиностойкости матрицы [172]. В исследовании синергетических эффектов полипропиленовой фибры и микрокремнезема в легких бетонах показано, что совместное применение микро- и макроволокон полипропиленовой фибры в суммарном объемном содержании 0,3–0,6 % улучшает удобоукладываемость смеси по сравнению с применением только макроволокон. Вместе с тем увеличение суммарного объемного содержания гибридной смеси волокон с 0,3 до 0,6 % при высоком содержании микрокремнезема снижает прочность на сжатие, однако значительно увеличивает прочность на растяжение при раскалывании, что свидетельствует о необходимости отдельной оптимизации дозировок компонентов гибридного армирования применительно к конкретному классу плотностей пенобетона [173].

Рецептуры дисперсно-армированных пенобетонов пониженной плотности при проектировании рационально подбирают на основе комплексного подхода, при котором тип и параметры пенообразователя целенаправленно выбирают так, чтобы пористая структура была устойчивой и долговечной, надежно удерживала армирующие волокна без их сегрегации и локального перераспределения. Функциональные модифицирующие добавки целенаправленно регулируют кинетику гидратации цемента и условия формирования контактной зоны между

цементной матрицей и фиброй, то есть межфазного переходного слоя. Через этот слой матрица передает напряжения волокнам. Состояние межфазного переходного слоя определяет общую эффективность дисперсного армирования. Водоудерживающая способность пенобетонной смеси предотвращает локальное обезвоживание в прифибровой зоне и обеспечивает полноту гидратации клинкерных минералов в тонких межпоровых перегородках. Упрочненные дисперсной арматурой межпоровые перегородки должны достигать нормируемых показателей прочности, поскольку от этого зависит долговечность пористой структуры в целом.

1.5. Методы контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов

1.5.1. Методы определения пористости ячеистых бетонов

Проектирование и применение ячеистых бетонов требуют детального изучения их поровой структуры для развития систем контроля и оценки их качества [174]. Размер пор, их форма, распределение и взаимосвязь с узлами и каналами во многом определяют физико-механические свойства материала, включая прочность и теплопроводность, а анализ порового пространства помогает совершенствовать составы и технологию изготовления ячеистых бетонов и повышать ресурсную и экологическую эффективность конструкций на их основе [175].

Для оценки поровой структуры ячеистых бетонов применяют комплекс взаимодополняющих методов (рисунок 1.5).

К наиболее информативным методам исследования относят рентгеновскую компьютерную томографию, принцип которой основан на регистрации степени ослабления рентгеновского излучения при прохождении через исследуемый образец. Плотные фазы бетона поглощают лучи иначе, чем воздушные поры, поэтому по серии проекционных изображений формируют трехмерную модель его внутреннего строения [176].

Компьютерная томография обеспечивает пространственную визуализацию пор и каналов и позволяет сохранить образец для последующих исследований, а разрешающая способность метода зависит от размеров исследуемого объекта. При

увеличении образца детализация изображения снижается. Точность анализа ограничивают недостаточный контраст между отдельными фазами, артефакты и сложность сегментации пор, а проведение исследования требует соблюдения норм радиационной безопасности, использования специализированного программного обеспечения и значительных вычислительных ресурсов.

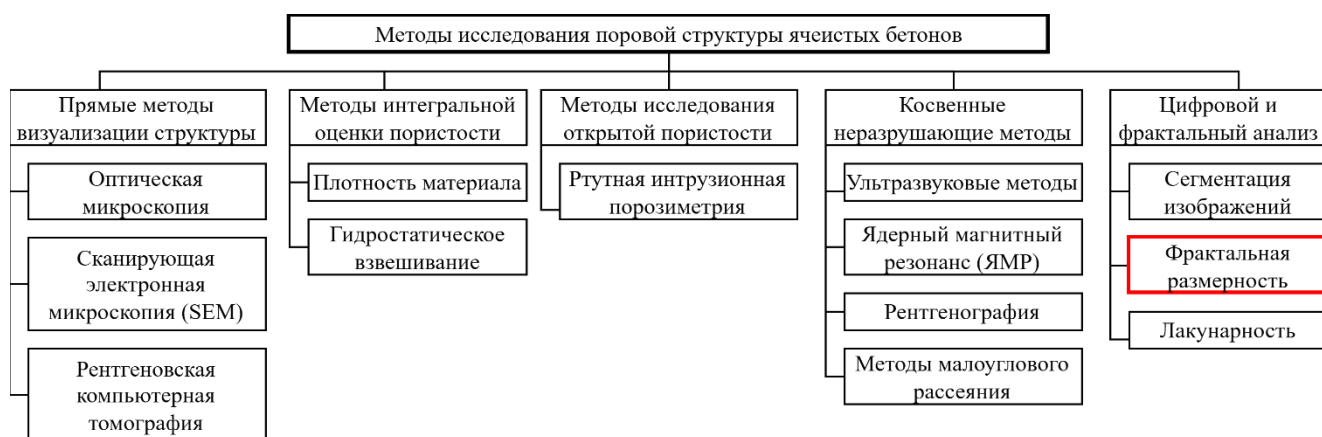


Рисунок 1.5 – Методы определения пористости ячеистых бетонов

Микроскопия объединяет группу методов, предназначенных для исследования поровой структуры ячеистых бетонов при различных масштабах увеличения [177], причем конкретный вид микроскопии выбирают с учетом задачи исследования и доступных средств.

Оптическая микроскопия использует видимый свет, которым освещают поверхность образца, после чего система линз формирует увеличенное изображение исследуемого материала. Для изучения порового пространства заранее готовят срезы или шлифы, по которым оценивают форму, размеры и распределение воздушных ячеек.

В сканирующей электронной микроскопии (SEM) изображение формируется в результате взаимодействия сфокусированного электронного пучка с поверхностью исследуемого материала. Метод обеспечивает высокую детализацию микроструктуры и позволяет изучать поры, микротрещины, продукты гидратации и особенности межфазных границ [177]. При использовании цифровой обработки SEM-изображений возможно количественное определение размеров, формы и пространственного распределения структурных элементов. Вместе с тем

получаемые изображения характеризуют преимущественно локальные участки поверхности или плоского сечения, а достоверность результатов зависит от качества подготовки образца и параметров сегментации.

Существенное значение при изучении пористости ячеистых бетонов имеют методы определения плотности. Одним из них является гидростатическое взвешивание, основанное на законе Архимеда. Образец взвешивают в воздушной и жидкой средах, после чего по разности полученных значений определяют его объем и рассчитывают плотность. Однако данный метод не позволяет установить размеры, форму и характер распределения пор, а при исследовании материалов с открытой пористостью требует учета проникновения жидкости в поровое пространство.

Для количественной оценки параметров порового пространства применяют поросиметрию, наиболее распространенной разновидностью которой является ртутная интрузионная поросиметрия. Метод основан на принудительном внедрении несмачивающей жидкости (ртути) в открытые поры под возрастающим давлением. По зависимости объема внедрившейся ртути от приложенного давления определяют распределение пор по размерам. Следует учитывать, что результаты характеризуют преимущественно размеры входных сечений пор, а предварительное высушивание и высокое давление могут изменять структуру исследуемого материала. Кроме того, токсичность ртути обуславливает необходимость строгого соблюдения требований безопасности.

Ультразвуковые методы относятся к неразрушающим способам исследования ячеистых бетонов и позволяют косвенно оценивать их структуру и физико-механические характеристики [178, 179]. При прохождении акустического импульса через материал фиксируют время его распространения, а при эхо-импульсной схеме определяют время возвращения отраженного сигнала [180].

Поровое пространство цементных материалов также исследуют с помощью ядерного магнитного резонанса (ЯМР), регистрируя отклик атомных ядер, обладающих магнитным моментом, на воздействие постоянного магнитного поля и радиочастотных импульсов. При изучении бетонов преимущественно применяют

протонный ЯМР, при котором фиксируют сигналы ядер водорода, содержащихся в поровой воде [181].

Рентгенография позволяет неразрушающим способом исследовать внутреннее строение материалов и выявлять в ячеистых бетонах поры, трещины и другие неоднородности [182]. Метод основан на прохождении высокоэнергетического рентгеновского излучения через образец. При взаимодействии с веществом часть фотонов поглощается или рассеивается, поэтому интенсивность прошедшего излучения зависит от толщины, плотности и химического состава материала. Пленочный или цифровой детектор регистрирует излучение, прошедшее через образец. Различия в степени его ослабления формируют контрастное проекционное изображение, на котором плотные участки цементной матрицы поглощают больше излучения, тогда как воздушные поры и другие полости поглощают его в меньшей степени.

Для количественной оценки поровой структуры ячеистого бетона используют цифровой анализ изображений. Сначала подготавливают исследуемую поверхность и получают исходные снимки, затем программно обрабатывают и сегментируют их, после чего анализируют морфометрические характеристики [183, 184]. Цифровые изображения позволяют оценить характер пористости и определить площадь, размеры, форму и распределение пор в пределах анализируемого сечения. Достоверность результатов в значительной степени зависит от качества подготовки поверхности, стабильности условий съемки и точности, с которой поровое пространство отделяют от цементной матрицы.

На первом этапе снимают один и тот же участок поверхности несколько раз, последовательно меняя направление освещения. Световой поток направляют под углом к исследуемой плоскости, поэтому внутренние поверхности пор затеняются, а цементная матрица отражает большую часть падающего излучения. Смена направления света снижает влияние случайных бликов и неровностей поверхности, которые искажают фактические границы пор. При съемке образец остается на месте, расстояние до регистрирующего устройства и параметры съемки не меняются, поэтому пиксели на всех полученных изображениях сохраняют пространственное соответствие.

Снимки обрабатывают в специализированной программе. Для каждого пикселя сопоставляют интенсивность красной, зеленой и синей составляющих цветовой модели RGB, а в итоговое изображение включают минимальные значения, зарегистрированные при разных направлениях освещения. Такой способ усиливает различие между затененными полостями и освещенной поверхностью цементной матрицы, поэтому поры становятся самыми темными участками изображения. Затем устраняют оптические шумы, корректируют контраст и проводят пороговую сегментацию: пиксели распределяют между двумя группами, соответствующими поровому пространству и твердой фазе материала. Полученное бинарное изображение используют, чтобы подсчитать поры и определить их геометрические характеристики.

Исследуемую поверхность предварительно контрастируют, чтобы повысить надежность сегментации. Образец последовательно шлифуют до плоского сечения с минимальным количеством рисок и локальных неровностей. Минеральную пыль после обработки удаляют струей сжатого воздуха, затем на подготовленную поверхность наносят пигментный состав на основе черной водорастворимой гуаши [185]. Краситель проникает в раскрытые поры и поверхностные углубления, создавая контрастный фон относительно цементной матрицы.

После высыхания нанесенного покрытия образец снова шлифуют, удаляя пигмент с выступающих участков твердой фазы, тогда как в порах он сохраняется. Затем поверхность еще раз очищают сжатым воздухом и сканируют на планшетном сканере, поддерживая неизменными разрешение, яркость и цветопередачу. На полученном изображении светлая цементная матрица отчетливо выделяется на фоне темных пор. Контрастирующие составы при подготовке бетонных сечений снижают вероятность того, что участки матрицы ошибочно примут за пустоты, и упрощают последующую бинаризацию.

Цифровое изображение переводят в полутоновый формат и задают пороговое значение интенсивности. Пиксели с интенсивностью, близкой к черному цвету, относят к поровому пространству, остальные – к твердой фазе; площадь пор в исследуемом сечении определяют по доле поровых пикселей в общем числе пикселей анализируемого участка. После разделения соприкасающихся объектов

для каждой выделенной поры измеряют площадь, периметр, эквивалентный диаметр, размеры по главным осям и коэффициент формы. Единый порядок подготовки поверхности и одинаковые параметры оцифровки обеспечивают сопоставимость результатов для пенобетонных образцов разных составов.

Рассмотренные способы отличаются сравнительно низкой трудоемкостью и не требуют дорогостоящего специализированного оборудования. Полученные данные описывают поровую структуру лишь в плоскости исследуемого сечения, причем точность зависит от качества подготовки поверхности, условий съемки и выбранных параметров сегментации изображения.

При изучении поровой структуры ячеистых бетонов получают сведения о морфологии, размерах, распределении и взаимосвязи пор, которые нужны для направленного регулирования свойств материала. У каждого из рассмотренных методов есть определенный диапазон измерений, собственная разрешающая способность и ограничения, поэтому отдельное применение одного метода не дает полной характеристики порового пространства.

Наиболее достоверные результаты получают при совместном использовании методов, работающих на разных масштабных уровнях. Такое сочетание позволяет исследовать структуру ячеистого бетона от крупных воздушных ячеек до капиллярных и гелевых пор, сопоставляя результаты прямых и косвенных измерений. При этом часть методов носит неразрушающий характер, тогда как другие требуют отбора, высушивания, шлифования или иной предварительной подготовки образцов.

1.5.2. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистых бетонов

Традиционные методы оценки пористости строительных материалов предоставляют лишь интегральные показатели среднего размера пор и общего объема пористого пространства, не раскрывая при этом сложную геометрию и топологию пористой структуры ячеистого бетона. Полученные данные не содержат информации о характере пространственного распределения пор, об иерархической организации пористого пространства, о связанности или разъединенности отдельных пор [186-189]. Между тем, именно эти характеристики микроструктуры

оказывают определяющее влияние на формирование механических, тепловых, акустических и других функциональных свойств материала [190].

Применение методов фрактального анализа к исследованию пористых структур ячеистых бетонов позволяет преодолеть эти существенные ограничения и выявить глубокие закономерности и характеристики самоподобия и масштабной инвариантности в распределении пор, которые существенно влияют на все основные механические и физико-химические свойства материала. Фрактальная геометрия, изначально разработанная в математике и теоретической физике, находит свое естественное применение при описании сложных природных и искусственных структур, которые демонстрируют закономерности повторения и самоподобия при различных масштабах наблюдения. Ячеистые бетоны как раз представляют собой такие структуры, в которых система пор организована иерархически [191-194].

Фрактальная размерность представляет собой информативный параметр для количественного описания сложных и многомасштабных пористых структур, отражающий степень заполнения пространства развитой пористой сетью и характер ее топологической организации. Материалы с более высокой фрактальной размерностью демонстрируют более развитую, сложно организованную и иерархически структурированную систему пор с большей удельной поверхностью, что может как положительно (за счет увеличения удельной поверхности и интенсификации физико-химических процессов), так и отрицательно (за счет снижения общей механической прочности и несущей способности твердого каркаса) влиять на их эксплуатационные характеристики [195, 196].

Разработка и совершенствование методик и подходов к определению фрактальной размерности пористых структур, специально адаптированных к особенностям ячеистых бетонов и их производственным циклам, требует глубокого и всестороннего понимания как теоретических и математических основ фрактального анализа, так и практических возможностей и ограничений современных экспериментальных методов исследования микроструктуры материалов [197-199].

Фрактал в математическом и физическом смысле представляет собой сложное множество или структуру, обладающую фундаментальным свойством самоподобия,

что означает идентичность или квазиидентичность его структурных характеристик и организации при различных масштабах и уровнях рассмотрения. Для природных и искусственных пористых материалов, включая ячеистые бетоны, явления фрактальности проявляются в том, что общий характер и закономерности распределения пор воспроизводятся при переходе от макроскопического уровня наблюдения, доступного невооруженному глазу или при малых увеличениях, к микроскопическому и даже ультрамикроскопическому уровню.

Фрактальная размерность (D_f) представляет собой нецелое число, часто называемое также размерностью подобия, которое описывает и количественно характеризует, как развитая и сложная структура заполняет окружающее ее евклидово пространство, и определяется из фундаментального соотношения между объемом (или площадью в двумерном случае) материала (V) и характерным линейным размером структурного элемента или ячейки анализа (r): $V \sim r^{D_f}$.

Это соотношение лежит в основе всех практических методов определения фрактальной размерности из экспериментальных данных [190].

Для двумерных изображений поровой структуры, получаемых при микроскопическом исследовании сечений, фрактальную размерность определяют по изменению площади или контура анализируемой фазы при варьировании масштаба наблюдения. Наиболее часто применяют метод подсчета ячеек, согласно которому число ячеек $N(a)$, содержащих исследуемый объект, связано с их размером a зависимостью $N(a) \sim a^{-D_f}$. Значение фрактальной размерности двумерного изображения находится в интервале от 1 до 2: приближение к единице соответствует линейным объектам, а к двум – более плотному заполнению плоскости. Для трехмерной поверхности порового пространства размерность, как правило, изменяется от 2 до 3, отражая степень сложности и неоднородности ее геометрии.

При исследовании ячеистых бетонов фрактальный анализ особенно важен, поскольку их поровая структура формируется при совместном протекании нескольких процессов, влияющих на геометрию пространства и взаимное расположение пор. Поры возникают при газообразовании после введения алюминиевой пудры либо формируются за счет заранее приготовленной пены. Гидратация и структурообразование цементного вяжущего, стабилизация и

коалесценция пузырьков, уплотнение межпоровых перегородок в процессе твердения протекают во взаимосвязи, поэтому итоговая геометрия порового пространства складывается под действием всей совокупности перечисленных процессов. Фрактальная размерность выражает эту сложную и неоднородную геометрию единым количественным показателем.

В ячеистых бетонах поровое пространство лишено идеальной упорядоченности и регулярности, поэтому поры распределены неоднородно, существенно различаются по размерам, имеют неправильную и часто сложную форму. Их пространственное размещение подчиняется иерархическим принципам организации.

Фрактальные параметры и методы анализа, которые применяют и развивают, учитывают объективную иерархическую сложность и многомасштабность структуры, выявляя скрытые и глубокие закономерности распределения пор. Эти закономерности коррелируют с механическими и физико-химическими свойствами материала. Фрактальный анализ дает новый взгляд на традиционные проблемы материаловедения.

В современной практике исследования пористых материалов применяются различные методологические подходы и алгоритмы к определению фрактальной размерности пористых структур. Каждый из этих методов имеет свои преимущества, области оптимального применения и существенные ограничения при применении к ячеистым бетонам. Выбор оптимального метода для конкретного исследования зависит от ряда факторов: типа материала, доступного оборудования для исследования, требуемого разрешения при анализе, объема анализируемых данных и целей исследования.

Метод подсчета ячеек (box-counting или grid-counting), является одним из наиболее практичных, универсальных и широко используемых методов в современной практике для определения фрактальной размерности двумерных изображений пористых структур и микроструктур материалов. Методология и процедура анализа предусматривает наложение на полученное микроскопическое изображение микроструктуры квадратной или прямоугольной сетки клеток (ячеек) различного размера, начиная с крупных размеров ячеек и последовательно

переходя к меньшим размерам. Для каждого конкретного размера ячейки (a) осуществляется подсчет количества ячеек ($N(a)$), которые содержат хотя бы часть структуры материала или видимые элементы пор [200]. Фрактальная размерность рассчитывается из углового коэффициента и наклона линии линейной регрессии при построении логарифмического графика зависимости логарифма количества занятых ячеек $\log N(r)$ от логарифма обратного размера ячейки $\log(1/r)$: $D_f = \log N(r) / \log(1/r)$. Эта математическая операция основана на фундаментальном соотношении масштабирования для фрактальных структур.

Практическое преимущество метода box-counting заключается в его относительной простоте реализации, в особенности при наличии современного компьютерного оборудования и специализированного программного обеспечения для обработки изображений и анализа изображений (ImageJ, MATLAB с Image Processing Toolbox и другие). Однако для получения точных результатов метод требует исходных изображений микроструктуры высокого качества, обычно полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) или конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (CLSM). Значительным ограничением является чувствительность метода к качеству подготовки образцов, к наличию артефактов, возникающих при подготовке образцов к микроскопическому анализу, и к качеству контрастирования изображений.

Метод массы-радиуса представляет собой альтернативный и дополнительный подход к определению фрактальной размерности, основанный на анализе радиального распределения вещества материала от выбранной центральной точки или центра тяжести структуры. Методология анализа предусматривает выбор произвольной или оптимально расположенной точки в структуре материала и для различных радиусов наблюдения (r), концентрически расширяемых от этой центральной точки, осуществляется расчет и оценка массы (или площади в двумерном случае) материала ($M(r)$) в пределах каждого этого радиуса. При наличии фрактальной структуры и фрактального распределения вещества масса пропорциональна радиусу в степени фрактальной размерности (D_f): $M(r) \sim r^{D_f}$.

Метод анализа лакуарности, хотя и не определяет непосредственно фрактальную размерность структуры, предоставляет дополнительную

информацию о степени и характере неоднородности пространственного распределения пор и материала в структуре. Параметр лакуарности характеризует, насколько неоднородно и неравномерно заполнено пространство материалом, показывая, существуют ли крупные «лакуны» (промежутки или пустоты) в структуре материала [201, 202].

Анализ лакуарности может использоваться для различения и дифференциации материалов, которые имеют одинаковую или близкую фрактальную размерность, но существенно различаются по характеру пространственного распределения пор и материала. Для ячеистых бетонов, полученных различными технологическими методами, метод лакуарности может выявить, например, эффект гравитационного оседания частиц цементной суспензии и жидкой фазы, приводящего к существенной неоднородности распределения пор по высоте формы во время процесса твердения. Этот метод позволяет количественно охарактеризовать такую неоднородность.

Методы малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и методы малоуглового рассеяния нейтронов представляют собой мощный, но требующий специального оборудования подход к определению фрактальной размерности и характеристик пористой структуры на масштабах от нескольких нанометров до микрометров. Эти методы основаны на анализе рассеяния пучка частиц (фотонов или нейтронов) на элементах структуры материала [203]. Анализ интенсивности рассеяния в функции углового вектора рассеяния позволяет определить фрактальные параметры структуры, параметр Пуада, характеристики размера и формы пор на масштабах, недостижимых для прямого микроскопического наблюдения. Данные методы особенно ценны для изучения микропор, коллоидных структур и квазиаморфных образований в ячеистых бетонах, которые в полной мере могут быть недоступны для прямого микроскопического анализа и наблюдения.

Сравнительный анализ методов определения фрактальной размерности пористых структур ячеистых бетонов систематизирован в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительный анализ методов определения фрактальной размерности пористых структур ячеистых бетонов

№	Метод определения фрактальной размерности	Исходные данные	Преимущества	Ограничения и проблемы
1	Box-Counting (подсчет ячеек)	2D изображения SEM/CLSM	Простота; широкая доступность программного ПО; универсальность	Чувствительность к качеству изображения; артефакты подготовки; ограничение 2D
2	Mass-Radius (масса-радиус)	3D изображения μ -СТ	Полная 3D информация; высокая точность анализа; объемное представление	Требует специального высокотехнологичного оборудования; дорогостоящее
3	Лакунарность	2D/3D изображения	Информация о неоднородности распределения пор; дополняет фрактальную размерность	Сложная интерпретация; требует больших вычислительных ресурсов; необходимо обучение
4	Анализ Фурье спектра	2D/3D изображения	Автоматизируемость; объективность; универсальность	Требует специальной математической подготовки; сложность реализации
5	SAXS/SANS спектральный анализ	1D кривые рассеяния	Информация на нанометровых масштабах; прямая информация о размере пор	Требует синхротронного излучения или нейтронного источника

Материалы, характеризующиеся относительно высокой фрактальной размерностью, обычно демонстрируют меньшую среднюю плотность, что может быть объяснено более развитой и сложно организованной структурой контактов между порами и, соответственно, более высокой долей активно работающего твердого каркаса.

1.6. Теоретические принципы получения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения

Теоретические принципы формирования эксплуатационных свойств теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения, основанные на взаимосвязи его компонентного состава, технологических факторов, закономерностей структурообразования и характеристик сформированной ячеистой структуры, представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Теоретические принципы получения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавногo твердения

Согласно представленной схеме (рисунок 1.6), свойства ячеистого бетона определяются взаимодействием компонентов и совокупностью физико-химических, реологических и структурно-механических процессов, протекающих при приготовлении пенобетонной смеси, введении пены и фибры, формовании, твердении и последующей эксплуатации материала.

Исходные составляющие образуют единую многокомпонентную систему, свойства которой зависят от вида и содержания каждого компонента, а также от характера взаимодействия между ними. Состав теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона задает условия формирования цементной матрицы, ячеистой структуры и армирующей системы. Изменение выбранных параметров влияет на структурообразование и отражается на свойствах получаемого пенобетона, поэтому соответствие параметров установленным требованиям обеспечивается непосредственно при подборе состава смеси и режима ее приготовления.

Дисперсное армирование формирует одно из направлений структурообразования теплоизоляционного пенобетона. Его влияние зависит от характеристик фибры, ее содержания и распределения в объеме, а также от взаимодействия с цементной матрицей, поскольку волокна фибры участвуют в формировании структуры цементной матрицы и межпоровых перегородок. Результат ее применения зависит от согласованности характеристик волокон с параметрами пенобетонной смеси и от того, насколько равномерно они распределены по объему материала.

Основным направлением теоретической концепции является формирование однородной ячеистой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона. Ее состояние зависит от устойчивости поровой системы, равномерности распределения пор и волокон, а также от целостности межпоровых перегородок. Структура материала связывает исходные параметры системы с итоговыми свойствами теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

Система контроля и оценки качества пористой структуры пенобетона рассматривается не как последовательность производственных операций, а как элемент проверки теоретически установленных взаимосвязей, сопоставляя заданные параметры состава и структуры с фактически полученными характеристиками материала. По результатам оценки устанавливается степень соответствия сформированной структуры принятой теоретической модели и определяют характер влияния рассматриваемых факторов на свойства пенобетона.

Таким образом, схема раскрывает теоретическую взаимосвязь «исходные компоненты и параметры армирования – процессы структурообразования – свойства материала – контроль и оценка качества». В данной системе контроль выполняет функцию обратной связи, посредством которой подтверждается соответствие полученных характеристик заданным критериям и оценивается обоснованность принятых принципов формирования теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения.

1.7. Выводы

1. Современное состояние производства и применения теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения показывает устойчивый рост интереса к этой группе материалов, которую рассматривают как перспективное направление энергоэффективного строительства. Когда нормативные требования к тепловой защите зданий ужесточаются, а государство проводит политику энергосбережения, формируется устойчивый долгосрочный спрос на теплоизоляционные ячеистые бетоны, снижающие энергопотребление в течение всего жизненного цикла здания и позволяющие сократить себестоимость производства.

2. Установлено, что поровая структура и физико-механические характеристики теплоизоляционного пенобетона формируются в результате комплексного взаимодействия компонентов сырьевой смеси – вяжущего, пенообразователя, минеральных добавок и воды. Совместное применение активных минеральных добавок и высококачественных пенообразователей обеспечивает направленное регулирование размера и однородности пор и

позволяет достигать нормируемых теплофизических показателей при минимальной средней плотности материала.

3. Установлено, что поровая структура и физико-механические характеристики теплоизоляционного пенобетона формируются благодаря комплексному взаимодействию компонентов сырьевой смеси, включая вяжущее, пенообразователь, минеральные добавки и воду. При совместном применении активных минеральных добавок и высококачественных пенообразователей с дисперсным армированием размер пор и их однородность регулируются направленно, благодаря чему материал достигает нормируемых теплофизических показателей при минимальной средней плотности.

4. Анализ методов определения параметров пористости ячеистых бетонов подтверждает необходимость разработки способа количественной оценки фрактальной размерности пористой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов по изображениям поверхности, обеспечивающего объективное описание ее геометрической неоднородности, применение которого позволит установить взаимосвязи между параметрами порового пространства, особенностями дисперсного армирования и теплофизическими и прочностными характеристиками материала.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

2.1. Характеристика применяемых материалов

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цемент», соответствующий ГОСТ 30515-2013 [204] и ГОСТ 31108-2020 [205].

Химический состав портландцемента приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав портландцемента

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

Минеральный состав и технические параметры портландцемента приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Минеральный состав и технические параметры портландцемента

Показатель	Значение
Минеральный состав клинкера, мас. %	
C ₃ S	61
C ₂ S	19
C ₃ A	7
C ₄ AF	13
Тонкость помола: остаток на сите № 008, мас. %	10
удельная поверхность, м ² /кг	300
Нормальная густота цементного теста, %	25,1
Сроки схватывания, мин	
начало	150
конец	220
Активность при пропаривании, МПа	34,2

В качестве дисперсного армирования в работе исследовалась полипропиленовая фибра различных производителей.

Полипропиленовая фибра производства ООО ПК «Альянс» (г. Санкт-Петербург, Россия) с длиной волокон 6 и 12 мм (рисунок 2.1). Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО ПК «Альянс» приведены в таблице 2.3.

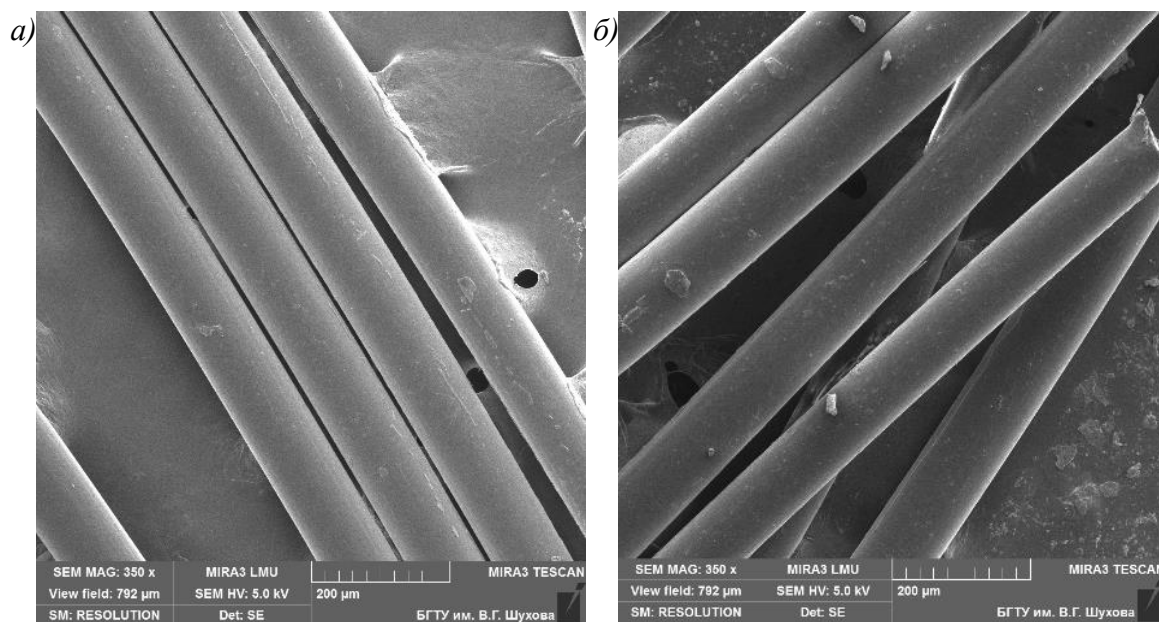


Рисунок 2.1 – Микроструктура полипропиленовой фибры производства ООО ПК «Альянс»:

a – длина волокон 6 мм; *б* – длина волокон 12 мм

Таблица 2.3 – Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО ПК «Альянс»

Показатель	Значение
Материал	Полипропилен
Внешний вид	Волокно белого цвета
Длина волокна, мм	6; 12
Диаметр волокна, мкм	40–100
Плотность, г/см ³	0,92
Температура плавления, °С	160–175
Предел прочности на разрыв, МПа	570
Модуль упругости волокна, МПа	875–4400
Относительное удлинение при разрыве, %	25-50
Влагопоглощение	Отсутствует
Химическая устойчивость	Щелочестойкая

Фибра изготавливается из 100 % полипропилена методом экструзии и соответствует ТУ 20.60.11-001-58951237-2022 [206]. Фибра представляет собой синтетическое микроволокно белого цвета, которое при введении в цементную смесь равномерно распределяется по всему объему, формируя хаотичную пространственную армирующую сетку. Ее применение обеспечивает снижение пластической усадки и трещинообразования, повышение трещиностойкости, водонепроницаемости и морозостойкости цементного камня.

Полипропиленовая фибра производства ООО «Лига-регион» (г. Всеволожск, Ленинградская обл.) с длиной волокон 12 мм (рисунок 2.2)

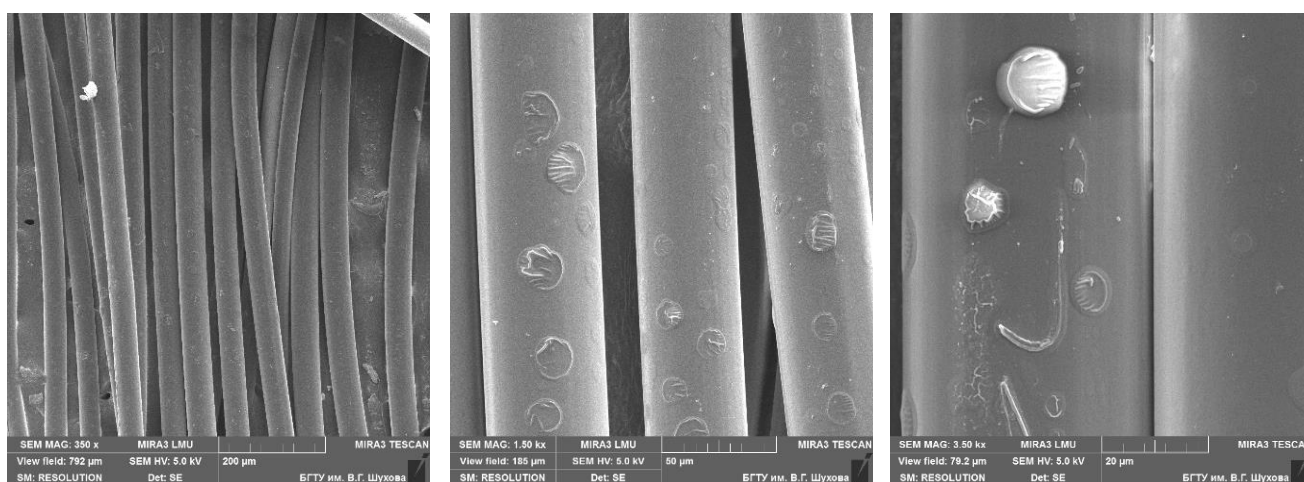


Рисунок 2.2 – Микроструктура полипропиленовой фибры производства ООО «Лига-регион»

Фибра представляет собой синтетическое полипропиленовое микроволокно длиной 12 мм, получаемое методом экструзии с последующим продольным вытягиванием в соответствии с ТУ 20.60.11-007-062399665-2021 [207]. Материал применяется для дисперсного армирования бетонных и растворных смесей, цементно-песчаных стяжек, штукатурных составов, изделий на гипсовом вяжущем, пено- и газобетона.

Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО «Лига-регион» приведены в таблице 2.4.

Полипропиленовая фибра производства ООО «Си Айрлайн» с длиной волокон 6 и 12 мм (рисунок 2.3), выпускаемая в соответствии с ТУ 2272-006-13429727-2007 [208].

Таблица 2.4 – Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО «Лига-регион»

Показатель	Значение
Материал	Полипропилен
Внешний вид	Волокно белого цвета
Длина волокна, мм	12
Диаметр волокна, мкм	20–25
Плотность, г/см ³	0,91
Температура плавления, °С	160–170
Предел прочности на разрыв, МПа	570
Модуль упругости волокна, МПа	7500
Относительное удлинение при разрыве, %	10
Влагопоглощение	Отсутствует
Химическая устойчивость	Щелочестойкая

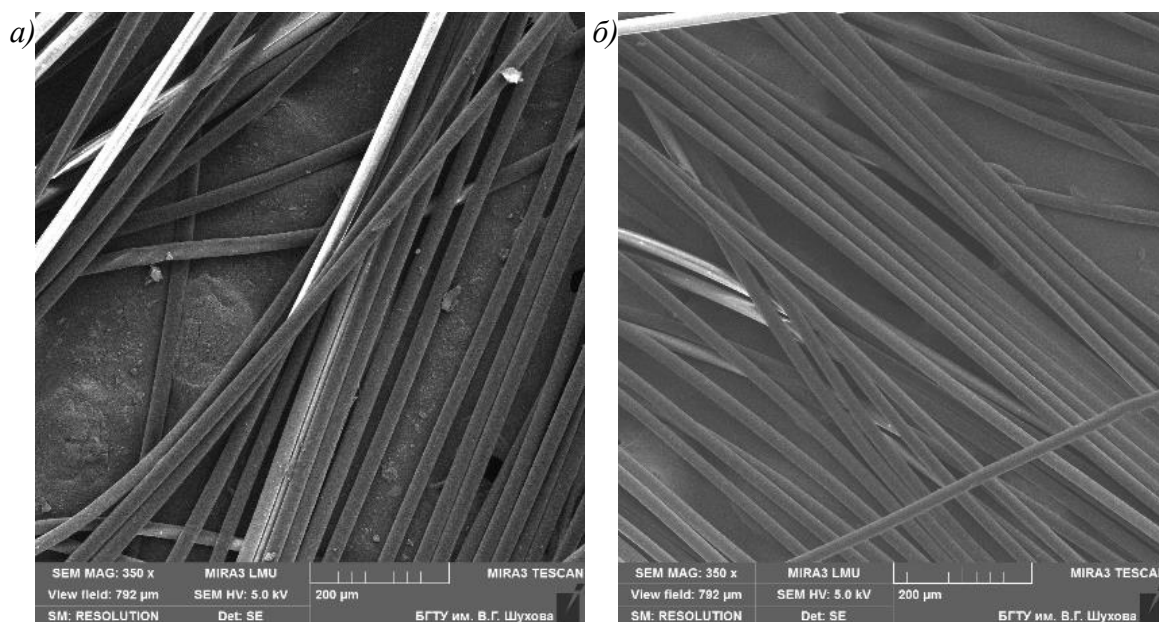


Рисунок 2.3 – Микроструктура полипропиленовой фибры производства ООО «Си Айрлайн»:

а – длина волокон 6 мм; *б* – длина волокон 12 мм

Фибра представляет собой фибриллированное высокоориентированное полимерное волокно коаксиальной структуры, получаемое из высокомодульного термопластичного полимера методом экструзии с последующей направленной структурной модификацией. В процессе изготовления обеспечивается повышение механической прочности сердцевины волокна и химической активности его поверхностного слоя по отношению к продуктам гидратации цемента, гипса и иных минеральных вяжущих.

Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО «Си Айрлайд» приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики полипропиленовой фибры производства ООО «Си Айрлайд»

Показатель	Значение
Материал	Высокомодульный термопластичный полимер на основе полипропилена
Внешний вид	Волокно белого цвета
Структура волокна	Высокоориентированная коаксиальная, бикомпонентная
Длина волокна, мм	6; 12
Средний диаметр волокна, мкм	17–25
Плотность, г/см ³	0,91
Температура плавления, °С	165–265
Предел прочности при разрыве, МПа	550
Модуль упругости волокна, МПа	13 000
Относительное удлинение при разрыве, %	до 25
Влагопоглощение	Отсутствует
Химическая устойчивость	Высокая; устойчиво к действию щелочной среды цементного камня

Полипропиленовая фибра Chuangsheng Building Materials Chemical Industry (Китай) с длиной волокон 6, 9 и 12 мм (рисунок 2.4). Данная фибра – монофиламентное синтетическое волокно из 100 % первичного полипропилена (C₃H₆)_n. Волокна формуют методом расплавной экструзии: полимер пропускают через формующие отверстия, затем охлаждают, вытягивают, термически стабилизируют и нарезают на отрезки заданной длины методом экструзии с последующей вытяжкой [209]. При вытяжке макромолекулярные цепи преимущественно ориентируются вдоль продольной оси волокна, что повышает его прочность при растяжении и модуль упругости.

Полипропиленовая фибра имеет низкую плотность, химически инертна, устойчива к воздействию воды и щелочной среды цементного камня, не склонна к коррозионному разрушению. Монофиламентная форма позволяет разделить фибру на отдельные элементарные волокна и при соблюдении технологического режима

равномерно распределить их по объему смеси. Волокна длиной 6 мм легче диспергируются и формируют более частую пространственную сеть. Фибра длиной 9 и 12 мм создает более протяженные армирующие связи между отдельными участками цементной матрицы.

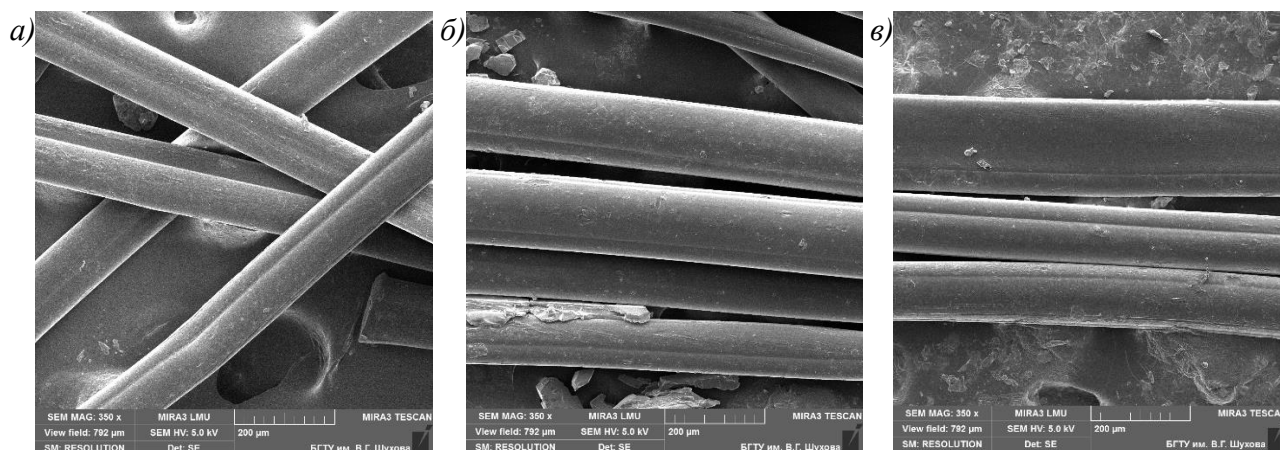


Рисунок 2.4 – Микроструктура полипропиленовой фибры производства Chuangsheng:

a – длина волокон 6 мм; *б* – длина волокон 9 мм; *в* – длина волокон 12 мм

Технические характеристики полипропиленовой фибры производства Chuangsheng приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики полипропиленовой фибры производства Chuangsheng

Показатель	Значение
Материал	Полипропилен
Внешний вид	Волокно белого цвета
Длина волокна, мм	6; 9; 12
Диаметр волокна, мкм	20–45
Плотность, г/см ³	0,91
Температура плавления, °С	160–175
Предел прочности при разрыве, МПа	450–560
Модуль упругости волокна, МПа	3500–4300
Относительное удлинение при разрыве, %	20 ±5
Влагопоглощение	Отсутствует
Химическая устойчивость	Стойкость к кислотам и щелочам

На основании предварительно проведенных исследований и исходя из необходимости сравнительной оценки влияния длины, диаметра и физико-механических характеристик полипропиленовых волокон на процессы структурообразования и свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения, для дальнейших исследований применялась полипропиленовая фибра ООО ПК «Альянс» (далее – фибра I) и полипропиленовая фибра Chuangsheng Building Materials Chemical Industry (далее – фибра II). Использование остальных рассмотренных фибр нецелесообразно, поскольку их отличия по типу волокна, характеру фибрилляции, структуре и технологии изготовления не позволили бы однозначно разделить влияние длины и диаметра волокон от влияния химической природы и морфологии фибр.

В качестве пенообразователей в исследовании рассмотрены три белковых (протеиновых) пенообразователя российского производства различной основы: «Экопен» (ООО «ВЕХА», г. Екатеринбург), «Rospena» (ООО «РОСПЕНА», г. Санкт-Петербург) и «Foam X» (ООО «Биопор», г. Москва).

Пенообразователь «Экопен», изготавливаемый по ТУ 2482-003-13420175-2006 [210], представляет собой протеиновый пенообразователь на основе гидролизата крови крупного рогатого скота (КРС). Исходным сырьем служит кровь животных, белки которой подвергаются направленному гидролитическому расщеплению в водном растворе, как правило, в щелочной среде, с получением пептидов и аминокислот, обладающих высокой поверхностно-активной способностью. Пенообразователь поставляется в виде жидкости темно-коричневого цвета, является экологически чистым и не токсичным и предназначен для приготовления технической пены при производстве пенобетона средней плотностью от 150 до 1800 кг/м³.

Пенообразователь «Rospena», выпускаемый в соответствии с ТУ 24.66.47.142-001-0139620869-2019 [211], относится к протеиновым реагентам на основе гидролизата натурального белкового сырья животного происхождения. Он представляет собой темную водорастворимую жидкость с характерным

техническим запахом, не склонную к ферментации и содержащую 25 % протеина и 4 % минеральных солей.

Пенообразователь «Foam X» [212] относится к комбинированным однокомпонентным реагентам. Его белковую основу образует гидролизат животного протеина, а стабилизирующие добавки повышают устойчивость пены в цементной среде и снижают усадочные деформации. Реагент совместим с цементами различных марок отечественного и импортного производства. Рабочий раствор применяют в концентрации 2,0–4,0 % для получения теплоизоляционных пенобетонов.

Технические характеристики исследуемых пенообразователей приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Технические характеристики белковых пенообразователей

Показатель	«Экопен»	«Rospena»	«Foam X»
Основа	Гидролизат белка крови КРС	Гидролизат натурального белкового сырья	Комбинированная белковая основа
Плотность при 20 °С, кг/м³	1130	1100-1130	1100
рН	8,0-9,0	6,5 ±0,2	7,0-8,0
Концентрация рабочего раствора, %	2,0-4,0	2,0-5,0	2,0-4,0
Выход пены из 1 кг концентрата, л	830	>830	830
Температура застывания, °С	-15	-15	-12
Рекомендуемый вес пены, г/л	40-50	45-70	20-70

В качестве минеральной добавки использовали технически очищенный сульфат алюминия производства ООО «АКВАХИМ», соответствующий требованиям ГОСТ 12966-85 [213]. Это соль алюминия и серной кислоты с общей формулой $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ [214]. Основные технические характеристики сульфата алюминия приведены в таблице 2.8.

В водной среде сульфат алюминия диссоциирует с образованием ионов алюминия и сульфат-ионов. Вследствие гидролиза ионов алюминия его растворы

характеризуются кислой реакцией среды. Жидкая товарная форма обеспечивает однородность материала, облегчает его дозирование и исключает дополнительную технологическую операцию предварительного растворения твердого продукта.

Таблица 2.8 – Технические характеристики сульфата алюминия

Показатель	Значение
Химическая формула	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Внешний вид	Жидкость с сероватым или желтоватым оттенком
Плотность, г/см ³	1,2–1,3
рН водного раствора	2,5–3,5
Содержание активного алюминия, %	8–10
Массовая доля нерастворимого остатка, %	0,5–0,7
Массовая доля железа (в пересчете на Fe_2O_3), %	0,3

В качестве суперпластификаторов применялись Elocrete и «Полипласт СП-1» производства ООО «Полипласт-Юг» (г. Краснодар). Суперпластификатор Elocrete содержит поликарбоксилатные эфиры в водном растворе и служит для направленного регулирования реологических свойств бетонных и растворных смесей в соответствии с требованиями ГОСТ 24211-2018 [215], ТУ 20.59.59-129-58042865-2021 [216].

Elocrete диспергирует частицы цемента и уменьшает их агломерацию в водной среде, высвобождая часть воды, которая прежде удерживалась в межзерновом пространстве. Так смесь становится подвижнее и однороднее без дополнительного расхода воды. Добавка повышает подвижность бетонной смеси с марки П1 до П5, снижает расход воды затворения не менее чем на 20 % при сохранении заданной удобоукладываемости и сохраняет первоначальную подвижность смеси П5 в пределах одной марки не менее 60 мин. Когда водоцементное отношение становится ниже, цементный камень приобретает более плотную и однородную структуру, его капиллярная пористость уменьшается, а прочность в раннем и проектном возрасте повышается. Для жидкого суперпластификатора Elocrete рекомендована дозировка от 0,3 до 1,5 % от массы цемента. Технические характеристики суперпластификатора Elocrete представлены в таблице 2.9.

Суперпластификатор «Полипласт СП-1» – нафталинсульфонатная добавка для цементных бетонов и строительных растворов, соответствующая ГОСТ 24211-2018 [215], ТУ 5870-005-58042865-05 [217]. Ее активную основу составляет смесь натриевых солей полиметиленнафталинсульфокислот различной молекулярной массы.

Таблица 2.9 – Технические характеристики суперпластификатора Elocrete

Показатель	Значение
Состав	Поликарбоксилатные эфиры
Форма	Жидкость от бесцветного до светло-коричневого цвета
Плотность водного раствора при 20 °С, г/см ³	1,03
рН 20 % раствора (20°С)	не менее 3,5

Суперпластификатор «Полипласт СП-1» действует посредством адсорбции анионных поверхностно-активных веществ на поверхности цементных частиц. Одноименные электрические заряды на зернах цемента вызывают электростатическое отталкивание частиц, из-за которого разрушаются флокуляционные агрегаты и высвобождается часть воды, связанной в межзерновом пространстве. В итоге повышается дисперсность цементной суспензии, растворная часть становится однороднее, а смесь приобретает требуемую подвижность без увеличения расхода воды затворения. Технические характеристики суперпластификатора «Полипласт СП-1» представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Технические характеристики суперпластификатора «Полипласт СП-1»

Показатель	Значение
Состав	Натриевые соли полиметиленнафталинсульфокислот
Форма	Водный раствор темно-коричневого цвета
Плотность водного раствора при 20 °С, г/см ³	Не менее 1,17
Активность водородных ионов, рН	8 ±1
Массовая доля сухого вещества в растворе, %	Не менее 32
Содержание хлорид-ионов, %, не более	0,1

Вода для затворения бетонов соответствует ГОСТ 23732-2011 [218].

Все материалы удовлетворяют требованиям соответствующих нормативных документов.

2.2. Методы исследований

2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов

Фракционный состав цемента определяли методом лазерной дифракции с помощью анализатора размеров частиц FRITSCH ANALYSETTE 22 (рисунок 2.5).

Прибор применяют для исследования порошкообразных материалов, суспензий и эмульсий. Диапазон измеряемых размеров составляет 0,5–1500 мкм. Результаты испытаний представляют в виде дифференциальных и интегральных кривых распределения



Рисунок 2.5 – Лазерный анализатор частиц – MicroSizer 201

частиц по размерам. По этим данным оценивают степень дисперсности и полидисперсность исследуемых материалов.

Принцип работы анализатора основан на регистрации углового распределения интенсивности лазерного излучения, рассеянного частицами исследуемой дисперсной системы. Подготовленную суспензию подавали в измерительную ячейку, через которую проходил лазерный пучок. Крупные частицы рассеивают свет преимущественно под малыми углами, а тонкодисперсные частицы формируют рассеяние под большими углами. Система фотодетекторов регистрирует возникающую дифракционную картину, затем программное обеспечение прибора обрабатывает данные с применением оптических моделей Фраунгофера или Ми. Программа рассчитывает распределение частиц по размерам, которое используют для оценки дисперсного состава минеральных компонентов.

Микроструктуру полученных образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3 (рисунок 2.6). Метод

позволил оценить морфологические особенности композитов, распределение структурных элементов, состояние межфазных границ, форму и размеры пор.



Рисунок 2.6 – Микроскоп
TESCAN MIRA 3

Микроскоп TESCAN MIRA 3 относится к типу FEG SEM и оснащен полевой эмиссионной электронной пушкой с катодом Шоттки. Прибор работает в условиях высокого или переменного вакуума в камере образцов, поэтому подходит для исследования материалов с различными электрофизическими свойствами. Его электронно-оптическая система формирует стабильные цифровые

изображения высокого качества, с низким уровнем шумов и без мерцания.

Специализированное программное обеспечение позволяет управлять микроскопом, настраивать параметры съемки, получать и обрабатывать изображения, а затем архивировать их. Результаты сохраняют в стандартных графических форматах и используют для автоматизированного определения размеров пор, частиц и других элементов микроструктуры. Программные средства калибровки и измерения повышают точность анализа электронно-микроскопических изображений. Необходимый уровень вакуума в рабочей камере устанавливается за несколько минут благодаря высокопроизводительному турбомолекулярному насосу. В области электронной пушки ионный насос поддерживает высокий вакуум, необходимый для стабильной работы катода Шоттки.

Фазовый состав исходных сырьевых компонентов исследовали методом рентгенофазового анализа на порошковом дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA (рисунок 2.7). Прибор использовали для качественной идентификации



Рисунок 2.7 – Порошковый
дифрактометр Thermo
Scientific ARL X'TRA

кристаллических фаз, определения параметров кристаллической структуры и количественной оценки содержания фаз в дисперсных материалах. Дифрактометр работает по схеме θ/θ в геометрии Брэгга–Брентано. При такой конфигурации система регистрирует дифракционные максимумы, последовательно изменяя угловое положение источника и детектора относительно неподвижного образца.

Принцип работы прибора основан на дифракции монохроматического рентгеновского излучения на атомных плоскостях кристаллического вещества. При облучении порошкообразного образца отраженное излучение усиливается, если выполняется условие Вульфа–Брэгга. Положение дифракционных максимумов на рентгенограмме задают параметры кристаллической решетки, поэтому по нему идентифицируют соответствующую фазу. Интенсивность максимумов связана с содержанием этой фазы в исследуемом материале.

Помол цемента проводили на роторно-шаровой мельнице «РШМ-МИКРОН» [219], представленной на рисунке 2.8. Мельница производства группы компаний «Экостройматериалы» (г. Белгород) предназначена для интенсивного тонкого и сверхтонкого измельчения материалов. В отличие от традиционных барабанных и вибрационных мельниц, в ней движение мелющей загрузки передают непосредственно роторы при неподвижном корпусе, благодаря чему процесс помола характеризуется высокой энергонапряженностью.



Рисунок 2.8 – Роторно-шаровая мельница «РШМ-МИКРОН»

Агрегат включает горизонтально расположенную рабочую камеру, футеровку которой выполняют из высокопрочной стали, керамики или полиуретана. Внутри камеры используют стальные либо керамические шары, движение которым придают два ротора. Среднескоростной ротор обеспечивает предварительное измельчение сырья, после чего высокоскоростной ротор доводит его до тонкого помола в той же рабочей зоне. Такая конструкция позволяет последовательно обрабатывать сырье в пределах одной камеры.

Материал, поступающий через загрузочный люк, подвергается комплексному воздействию ударных нагрузок, истирания и сдвига, поэтому частицы уменьшаются в размерах и проходят механохимическую активацию, сопровождающуюся ростом удельной поверхности, образованием структурных дефектов и повышением реакционной способности. Мельница работает в периодическом или непрерывном режиме. При интенсивном измельчении выделяется тепло, поэтому рабочую камеру охлаждают водой. Система поддерживает стабильный температурный режим и предотвращает перегрев материала. Режим работы настраивают с учетом свойств сырья, меняя частоту вращения роторов, степень заполнения камеры, вид и размер мелющих тел, интенсивность аспирации. Роторно-шаровую мельницу «РШМ-МИКРОН» применяют для измельчения цементов, известково-кремнеземистых вяжущих, гипса, пигментов, огнеупорных материалов и другого минерального сырья. Технические характеристики роторно-шаровой мельницы «РШМ-МИКРОН» приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Технические характеристики роторно-шаровой мельницы «РШМ-МИКРОН»

Показатель	Значение
Размер частиц на входе в мельницу, мм	до 3
Средний размер получаемых частиц при сухом помоле, мкм	1-2
Средняя удельная поверхность сырья после помола, см ² /г	14000
Возможность мокрого помола	да
Максимальная производительность агрегата, т/ч	0,1-15
Установленная мощность, кВт	56
Производительность при одинаковом домоле цемента (в 2 раза), кг/ч	3200
Расход э/энергии на тонну помола, кВт/т	18,6

Техническую пену для пенобетонной смеси получали с использованием пенобетоносмесителя СПБл-5 (рисунок 2.9). Установка непрерывно формирует мелкодисперсную пену, принудительно смешивая предварительно приготовленный водный раствор пенообразователя со сжатым воздухом [220]. Пенобетоносмеситель позволяет регулировать кратность, плотность и однородность пены, благодаря чему стабилизируется порообразование в формуемой цементно-песчаной системе.

Установка диспергирует раствор пенообразователя потоком сжатого воздуха. Насос подает рабочий раствор из расходной емкости в смесительную камеру, куда поступает воздух от компрессора. После прохождения через жиклер и пористую насадку жидкая и газовая фазы интенсивно перемешиваются, образуя воздушно-механическую пену. Затем пена проходит через пенообразующую кассету. В ней воздушные включения дробятся, дисперсность повышается, а размеры пузырьков выравниваются. Технические характеристики пенобетоносмесителя СПБл-5 приведены в таблице 2.12.



Рисунок 2.9 – Пенобетоносмеситель СПБл-5

Таблица 2.12 – Технические характеристики пенобетоносмесителя СПБл-5

Технические характеристики	Ед. изм.	Значение
Питание	В	220
Масса	кг	30
Высота загрузки	мм	600
Объем рабочей емкости	л	5
Объем готовой смеси	л	5
Время перемешивания	мин.	3-4
Частотный инвертор для регулировки оборотов	—	есть

Кратность (выход пены) в исследовании рассматривалась как один из ключевых параметров, характеризующих эффективность поризации и экономичность расхода пенообразователя [221]. Под кратностью пены понимается отношение объема сформированной пены к исходному объему раствора пенообразователя, используемому для ее получения. Данный показатель вычисляли по зависимости (2.1):

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

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

Экспериментальные исследования **стабильности пены** выполнялись в соответствии с методологией, предложенной в [221], с сохранением последовательности операций.

Водоотделение пены и характеристики ее дренирования исследовали путем измерения объема жидкости, выделяющейся из навески свежеприготовленной пены массой 100 г, помещенной в мерный цилиндр в соответствии с [221]. В ходе испытания фиксировали время отделения первой капли t_1 , мин, и объем водоотделения через равные интервалы времени от 5 до 30 мин.

На основе полученных данных рассчитывались два производных показателя. Условный интегральный коэффициент стабильности пены K_s , мин/мл, определялся как отношение времени отделения первой капли к суммарному объему жидкости, выделившейся за 30 минут испытаний, по формуле (2.2):

$$K_s = \frac{t_1}{V_{30}}, \quad (2.2)$$

где t_1 – время отделения первой капли, мин; V_{30} – объем жидкости, отделившейся за 30 мин испытаний, мл. Коэффициент K_s отражает, сколько минут пена сохраняет квазистационарное состояние на единицу объема дренировавшей жидкости.

Средняя **интенсивность дренирования** $\bar{I}$, мл/мин, рассчитывалась как отношение прироста объема отделившейся жидкости за интервал с 5 по 30 мин к продолжительности этого интервала по формуле (2.3):

$$\bar{I} = \frac{V_{30} - V_5}{\Delta t}, \quad (2.3)$$

где V_5 и V_{30} – объемы жидкости, отделившейся к 5-й и 30-й минутам испытания соответственно, мл; $\Delta t = 25$ мин – продолжительность расчетного интервала. Данный показатель характеризует установившуюся скорость стекания жидкости из пенного скелета после завершения начальных переходных процессов и по физическому смыслу близок к средней скорости дренирования, применяемой в работах по кинетике стекания белковых пен.

Определение **нормальной густоты и сроков схватывания** цементного теста проводилось с использованием прибора Вика в соответствии с требованиями ГОСТ 310.3-76 [222]. Стандарт распространяется на цементы всех видов и регламентирует методику подготовки цементного теста, тип и параметры индентора, а также критерии фиксации начала и конца схватывания. Цементное тесто в настоящем исследовании вымешивалось вручную до достижения визуально однородной консистенции, после чего закладывалось в кольцо прибора Вика.

Для оценки **растекаемости** смеси применяли метод расплыва конуса соответствии с ГОСТ 310.3-76 [222]. Для испытания готовили 250 см³ растворной смеси, обеспечивая заданную рецептурой подвижность, и укладывали ее в металлический конус до уровня верхнего обода. Заполнение проводилось без уплотнения ударами, чтобы исключить дополнительное вовлечение воздуха и искажение результатов. После заполнения конус аккуратно поднимали строго вертикально с постоянной скоростью, обеспечивая свободное растекание пенобетонной смеси по стеклянной плите под действием собственного веса. На стекле, под конусом, был нанесен круг с концентрическими окружностями, что позволило визуально оценивать диаметр расплыва по делениям.

2.2.2. Методы исследования физико-механических характеристик теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона определены с использованием разработанной программы расчета состава теплоизоляционного пенобетона (приложение А) [223].

Основные физико-механические характеристики пенобетонных образцов определялись согласно ГОСТ 25485-2019 [35].

Среднюю плотность затвердевшего теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона определяли по требованиям ГОСТ 12852.0–2020 [224] и ГОСТ 27005–2014 [225]. В каждую серию включали не менее трех образцов. Для контроля использовали кубы размерами 100×100×100 мм. Перед испытанием образцы очищали от посторонних частиц, измеряли их линейные размеры и определяли массу. Образцы, предназначенные для установления средней плотности пенобетона в сухом состоянии, предварительно высушивали до постоянной массы.

Среднюю плотность отдельного образца рассчитывали как отношение его массы к фактическому объему, который определяли по результатам измерения геометрических размеров. Полученное значение корректировали с учетом остаточной влажности и приводили к абсолютно сухому состоянию. Среднюю плотность пенобетона в сухом состоянии, кг/м³, рассчитывали по формуле (2.4):

$$\gamma_{\text{сух}} = \frac{\gamma_{\text{вл}}}{(1+0,01W)}, \quad (2.4)$$

где $\gamma_{\text{вл}}$ – средняя плотность пенобетона в состоянии естественной влажности, кг/м³; W – влажность пенобетона, %.

За результат испытаний принимали среднее арифметическое значений, полученных для трех образцов. Контроль и оценку средней плотности проводили по [225], распространяющемуся на легкие и ячеистые бетоны, для которых нормируют этот показатель.

Прочность на сжатие образцов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [226]. Испытания проводили методом кратковременного статического нагружения на испытательной машине МИФ–600.1.2.С. Стандарт предписывает оценивать прочность бетона по минимальному усилию, при котором разрушается контрольный образец; нагрузку при этом непрерывно увеличивают с постоянной скоростью.

Чтобы оценить однородность свойств пенобетонного массива, образцы размером 100×100×100 мм отбирали на разных уровнях его высоты, в верхней,

центральной и нижней частях. Перед испытаниями образцы осматривали, измеряли их геометрические размеры и определяли площадь рабочего поперечного сечения. Затем каждый образец размещали в центре нижней опорной плиты испытательной машины, чтобы усилие равномерно распределялось по рабочей поверхности. Нагружение продолжали непрерывно до разрушения. За разрушающую нагрузку принимали максимальное усилие, зафиксированное во время испытания. Скорость нарастания напряжения при испытании на сжатие устанавливали согласно [226].

Прочность на сжатие R , МПа, вычислялась по формуле (2.5):

$$R = \alpha \cdot F/S \cdot k \quad (2.5)$$

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

Прочность на растяжение при изгибе определяли в соответствии с [226] на испытательной машине МИФ – 600.1.2.С методом трехточечного изгиба. Испытанию подвергали серии из трех образцов-призм размером 100×100×400 мм в возрасте 28 сут. Прочность при изгибе $R_{btb}^{обр}$, МПа, вычисляли по формуле (2.6):

$$R_{btb}^{обр} = \frac{F \cdot l}{a \cdot b^2}, \quad (2.6)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н; l – расстояние между опорами, мм; a – ширина поперечного сечения призмы, мм; b – высота поперечного сечения призмы, мм.

Для образцов-призм с наименьшим размером поперечного сечения 100 мм масштабный коэффициент принимали равным 0,92 согласно [226]. При расчете средней прочности серии исключали результаты образцов, разрушившихся за пределами средней трети пролета, а также образцов, у которых плоскость разрушения отклонялась от вертикали более чем на 15°.

Коэффициент **паропроницаемости** теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона определяли по ГОСТ 25898-2020 [227]. Для испытаний из разных участков затвердевшего пенобетонного массива выпиливали образцы размером 100×100×30 мм, их поверхности выравнивали и очищали от продуктов распиловки, затем измеряли фактическую толщину и герметично закрепляли

образцы в испытательных сосудах. Метод основан на создании разности парциальных давлений водяного пара по разные стороны образца и определении массы влаги, которая проходит через единицу его площади за установленный промежуток времени.

Испытательные сосуды с образцами периодически взвешивали, пока перенос водяного пара не достигал стационарного режима. Его фиксировали, когда разность результатов взвешиваний, выполненных через равные промежутки времени, оставалась практически постоянной. По полученным данным рассчитывали плотность потока водяного пара, сопротивление паропрооницанию и коэффициент паропрооницаемости исследуемого пенобетона. Коэффициент паропрооницаемости, выраженный в $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, находили, разделив среднюю толщину образца на его сопротивление паропрооницанию.

Определение **усадки** образцов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона проводилось по ГОСТ 25485–2019 [35]. Испытания проводили на трех образцах-призмах размером $40 \times 40 \times 160$ мм, выпиленных из затвердевшего массива пенобетона. В центре торцевых граней каждой призмы закрепляли металлические реперы, служившие опорными точками при измерении продольного размера. Усадку оценивали по относительному уменьшению длины образцов при снижении влажности с 35 до 5 мас. %.



Рисунок 2.10 – Прибор для измерения теплопроводности ИТП-МГ4 «100»

Коэффициент теплопроводности пенобетона определяли методом стационарного теплового потока в соответствии с ГОСТ 7076–99 [228], используя измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100» (рисунок 2.10). Прибор предназначен для определения теплопроводности и термического сопротивления строительных и теплоизоляционных материалов. Диапазон измерения коэффициента теплопроводности составляет от 0,02 до 1,5 Вт/(м·°С),

термического сопротивления – от 0,01 до 1,5 $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$, а предел допускаемой

относительной погрешности при измерениях в стационарном режиме не превышает $\pm 5\%$.

Предварительно высушенный образец помещали между нагревательной и охлаждающей плитами прибора, чтобы его поверхности плотно прилегали к рабочим элементам измерительной камеры. Во время испытания между противоположными гранями образца задавали и поддерживали установленную разность температур. После выхода на стационарный тепловой режим прибор измерял плотность теплового потока и температуру противоположных поверхностей образца, затем по этим данным автоматически рассчитывал его термическое сопротивление и коэффициент теплопроводности. Прибор автоматически регулировал температуру нагревателя и холодильника, термостатировал образец и обрабатывал результаты в цифровом виде, что обеспечивало стабильность условий испытания и воспроизводимость полученных значений.

2.2.3. Методы исследования макропористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Показатель фрактальной размерности пористой структуры пенобетонов определялся на основе способа определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов, разработанного на кафедре строительства и городского хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова (приложение Б) [229].

Реализация разработанного способа включает следующие действия:

1. Изготавливают образец ячеистого бетона с размерами сторон лицевой поверхности не менее 100 мм.
2. Лицевую поверхность ячеистого бетона подвергают шлифовке до получения однородной поверхности с ее периодической продувкой сжатым воздухом для предотвращения закупорки ячеистых пор.
3. Цифровую фотокамеру располагают параллельно лицевой поверхности образца ячеистого бетона.
4. С помощью цифровой фотокамеры производят получение цифрового изображения лицевой поверхности ячеистого бетона.

5. Полученное цифровое изображение импортируют в специализированную программу для обработки изображений для бинаризации.

6. Бинаризированное изображение импортируют в специализированную программу для обработки изображений, в котором задают разрешение изображения с заданным количеством пикселей, принимаемое за размер ячеек h .

7. Определяют количество пикселей попиксельного значения RGB на изображении, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, принимаемое за количество ячеек N из общего числа ячеек, соответствующего разрешению цифрового изображения.

Пункты 6 и 7 повторяют несколько раз, изменяя разрешение изображения с заданным числом пикселей, принимаемое за размер ячеек h .

8. Строят график зависимости $\ln(N)$ от $\ln(h)$. Методом наименьших квадратов строят прямолинейную зависимость $\ln(N) = k \cdot \ln(h)$ и определяют тангенс угла наклона полученной прямой. Значение тангенса угла наклона соответствует значению фрактальной размерности D_p .

Предварительная обработка поверхности ячеистого бетона, включающая шлифовку до ровной однородной поверхности и продувку поверхности компрессором, обеспечивает четкую визуализацию пористой структуры с максимально выраженной и достоверной пористой структурой на цифровых изображениях, получаемых с помощью цифровой фотокамеры, за счет устранения неровностей и загрязнений, влияющих на качество съемки и контрастность изображений.

В предложенном способе определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистого бетона достигается требуемый технический результат, заключающийся в повышении точности определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов за счет получения достоверных данных о фрактальной размерности пористой структуры ячеистого бетона по цифровому изображению его лицевой поверхности.

Определение общей поверхностной пористости, распределения пор по размерам и их среднего диаметра осуществлялось с использованием авторской программы расчета параметров пористости ячеистых бетонов, разработанной на кафедре строительства и городского хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова (приложение В) [230].

Разработанный алгоритм основан на методах компьютерного зрения и цифровой обработки изображений, обеспечивающих преобразование растрового снимка в совокупность количественных параметров поровой структуры. В качестве исходных данных используют цифровое изображение поверхности образца и его фактические геометрические размеры по высоте и ширине, заданные в миллиметрах. Сопоставление линейных размеров изображения в пикселях с реальными размерами образца позволяет определить масштабные коэффициенты и представить результаты измерений в физических единицах.

На начальном этапе изображение загружается и конвертируется в формат с одним каналом яркости, что уменьшает объем обрабатываемой информации и облегчает последующие вычисления. Определяются размеры изображения в пикселях по вертикали и горизонтали; далее на основании введенных пользователем физических размеров рассчитывается масштабный коэффициент «пиксель–миллиметр», который используется для перевода всех геометрических характеристик пор (диаметра, площади) из пиксельных единиц в миллиметры. Следующим шагом выполняется автоматическое пороговое разделение изображения. Для этого применяется метод Оцу, позволяющий по гистограмме яркостей подобрать такой порог, при котором исходное изображение наилучшим образом разделяется на две области – фон и объекты. В результате формируется бинарное изображение, на котором потенциальные поры представлены областями одного цвета на контрастном фоне.

После бинаризации выполняется сегментация изображения с выделением отдельных областей, соответствующих порам, на основе алгоритмов поиска и маркировки связных компонент. Для каждой области определяются ее граница и

геометрический центр, а контур аппроксимируется простой геометрической фигурой – окружностью или эллипсом, что упрощает расчет эквивалентного диаметра и площади. Полученные в пикселях значения пересчитываются в миллиметры с использованием установленного масштабного коэффициента.

Затем программа подсчитывает число пор на анализируемом фрагменте и суммирует их площади. Она также вычисляет средний диаметр, среднюю площадь пор и относительную поверхностную пористость, которую определяют как отношение суммарной площади пор к площади изображения. Для анализа распределения размеров строятся гистограммы диаметров и площадей с заданным шагом разбиения. По их форме поровую структуру относят к мелкопористому, крупнопористому или бимодальному типу.

Результаты представлены в табличной и графической формах. В них приведены значения общей поверхностной пористости, среднего диаметра и количества пор, статистические показатели распределения, включая среднее значение, минимум, максимум и медиану, а также данные для построения гистограмм.

Распознанные поры дополнительно визуализируются непосредственно на исходном снимке. Их контуры или аппроксимирующие эллипсы накладываются на микрофотографию, благодаря чему результаты автоматической сегментации сопоставляются с реальным строением поверхности и оценивается корректность распознавания.

Определение фрактальной размерности пористой структуры образцов дисперсно-армированных пенобетонов определялось с использованием авторской программы расчета фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов (приложение Г) [231].

Данный программный модуль реализует классический подход box-counting (метод ячеек), адаптированный к особенностям микрофотографий пористых материалов. На вход программа получает изображение поверхности образца, которое первоначально переводится в оттенки серого и подвергается бинализации

по методу Оцу для выделения порового каркаса. В результате формируется бинарное изображение, где интересующая структура (контуры пор либо твердый скелет, в зависимости от выбранного режима) представлена единичными значениями на нулевом фоне.

После получения бинарного представления выполняется этап выделения контуров: с помощью алгоритмов поиска границ формируется изображение, на котором единичные значения соответствуют только линиям контура, а внутренние области заполняются нулем. Далее на изображение последовательно накладываются квадратные сетки различного шага. Для каждого размера ячейки производится подсчет количества ячеек, в которых присутствует хотя бы один пиксель контура. На основании набора пар «размер ячейки – количество занятых ячеек» формируются логарифмические зависимости $\log N(a)$ от $\log(1/a)$, где a – линейный размер ячейки, $N(a)$ – число ячеек, содержащих часть контура.

Фрактальную размерность находят методом линейной регрессии по точкам, расположенным в логарифмических координатах. На графике она соответствует угловому коэффициенту аппроксимирующей прямой. Полученное значение характеризует геометрическую сложность исследуемой структуры и степень заполнения ею плоскости в пределах рассматриваемого диапазона масштабов.

Программа также проводит морфометрический анализ бинаризованного изображения. Она выделяет отдельные поры, вычисляет площадь каждой поры и ее эквивалентный диаметр, переводит значения, заданные в пикселях, в физические единицы, после чего определяет статистические характеристики выборки. В итоговый набор входят фрактальная размерность, средние значения эквивалентного диаметра и площади пор, диапазоны изменения этих показателей, а также график зависимости числа занятых ячеек от их линейного размера в логарифмических координатах. По этому графику визуально оценивают степень линейности зависимости в логарифмических координатах и корректность применения фрактальной модели к анализируемой структуре.

Корреляция значений фрактальной размерности пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения с его физико-механическими характеристиками определялась с использованием авторской программы оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов методом фрактального анализа (приложение Д) [232].

Программа автоматически анализирует пористую структуру ячеистого бетона по цифровому изображению поверхности, шлифа или микрофотографии образца и выделяет характеристики порового пространства. Сначала изображение загружают в градациях серого, затем его переводят в бинарный формат. Метод Оцу по умолчанию определяет порог яркости по гистограмме изображения и разделяет фазы. При необходимости используют фиксированное пороговое значение. Темные пиксели бинарного изображения относят к поровому пространству, светлые пиксели – к твердой матрице материала.

По бинарной маске программа вычисляет площадную пористость как отношение площади всех пикселей пор к площади изображения, затем выделяет связные области и рассматривает каждую из них как отдельную пору. Чтобы цифровой шум не искажал результаты, из дальнейшего анализа удаляют объекты, площадь которых меньше установленного минимума. Для каждой выделенной поры рассчитывают площадь в пикселях и квадратных миллиметрах, координаты центра, эквивалентный диаметр и коэффициент вытянутости. Линейные и площадные характеристики переводят в физические единицы с учетом заранее заданного размера пикселя.

Эквивалентный диаметр рассчитывают как диаметр круга, площадь которого равна площади выделенной поры. По этому показателю поры относят к микропорам, малым, средним или крупным порам. Для каждой размерной группы определяют количество пор и долю их площади в общей площади учтенного порового пространства. Полученные показатели характеризуют суммарную пористость и распределение пор по размерам, показывая преобладание мелких

равномерно расположенных пор либо наличие крупных ячеек, ухудшающих структурную однородность материала.

Помимо обычных пор, программа выявляет объекты, условно относимые к дефектам, включая поры с эквивалентным диаметром более 2 мм и вытянутые области, где отношение большей стороны ограничивающего прямоугольника к меньшей превышает установленный порог. По своим признакам такие объекты связывают с крупными кавернами, слияниями пор или трещиноподобными образованиями. Программа подсчитывает количество этих объектов и определяет долю занимаемой ими площади относительно площади всего изображения. На визуальной карте дефекты выделяются красным цветом, обычные поры обозначаются зеленым.

Сложность и масштабную организацию порового пространства программа оценивает с помощью метода box-counting, при котором на бинарное изображение последовательно накладываются квадратные сетки различного размера. Для каждой сетки подсчитывается число ячеек, содержащих хотя бы один пиксель поры, после чего по полученным значениям строится зависимость. Фрактальную размерность находят по угловому коэффициенту линейной аппроксимации этой зависимости.

На заключительном этапе программа сопоставляет полученное значение фрактальной размерности с заданными опорными значениями для марок ячеистого бетона по средней плотности. Программа выбирает ту марку, для которой различие между рассчитанной и опорной фрактальной размерностью минимально.

2.3. Выводы

1. Исследование сырьевых компонентов и разработанных теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов неавтоклавного твердения выполнено с использованием комплекса современных стандартизированных методов и высокоточного лабораторного оборудования, что обеспечило достоверность и воспроизводимость результатов при оценке их пригодности для дальнейшего применения.

2. Установлено, что применяемые вяжущее, дисперсное армирование, белковые пенообразователи, минеральные и химические добавки, а также вода затворения удовлетворяют требованиям действующих нормативных документов и обеспечивают возможность целенаправленного регулирования реологических свойств смесей, параметров поризации и эксплуатационных характеристик теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов.

3. Реализованный в работе комплекс методик, включающий оценку параметров пены, реологических и физико-механических характеристик пенобетонных смесей и затвердевших материалов, а также использование авторских программных средств для анализа пористой структуры и фрактальной размерности, обеспечивает всестороннее и количественно обоснованное исследование макро- и микроструктуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

3.1. Исследование механизма формирования и стабильности пористой структуры пенобетона в процессе твердения

Пористая структура теплоизоляционного пенобетона формируется в ходе многостадийной эволюции дисперсной газожидкостной системы, которая превращается в твердеющее пористое тело и при этом заметно меняет термодинамическое состояние, а также морфологию структурных элементов. Теоретическое рассмотрение структурообразования пенобетонов опирается на фундаментальные положения термодинамики необратимых процессов, коллоидной химии поверхностных явлений, теории устойчивости дисперсных систем и физико-химической механики твердения минеральных вяжущих [233].

В рамках нелинейной термодинамики пористая структура формируется в ходе самоорганизации открытой неравновесной системы, где конкурируют два противоположно направленных механизма. Коалесценция пузырьков и утончение жидких пленок дестабилизируют пенную структуру. Ее устойчивость поддерживают рост вязкости дисперсионной среды и пространственный каркас, который формируют частицы твердой фазы. Кинетика структурообразования задается соотношением характерных времен этих конкурирующих процессов, что позволяет трактовать устойчивость пористой структуры как критерий достижения системой стационарного неравновесного состояния.

Теоретические предпосылки описания коалесценции пузырьков в свежеприготовленной цементной системе опираются на классическую теорию устойчивости лиофобных коллоидных систем и молекулярно-кинетическую теорию утончения и разрыва тонких жидких пленок.

Механизм коалесценции определяется балансом термодинамических сил, действующих в системе трех контактирующих фаз: газовой (воздух в пузырьках), жидкой (цементная суспензия) и твердой (частицы цемента). Движущей силой процесса является стремление системы к минимизации избыточной свободной

энергии межфазной поверхности, которая для совокупности пузырьков в жидкости определяется выражением:

$$\Delta G_s = \gamma \sum_{i=1}^N 4\pi R_i^2, \quad (3.1)$$

где ΔG_s – суммарное изменение свободной поверхностной энергии Гиббса всей дисперсной системы; γ – межфазное натяжение на границе «жидкость – газ», R_i – радиус i -го пузырька, N – общее число пузырьков в системе.

Полидисперсная пенная структура в начальный момент после смешивания представляет собой термодинамически неустойчивую систему, характеризующуюся избыточной межфазной энергией и градиентами капиллярного давления между пузырьками различных размеров. Стабилизация отдельных пузырьков достигается формированием тонких межпузырьковых перегородок – симметричных жидких пленок толщиной h от 10 до 50 мкм, содержащих адсорбционные слои поверхностно-активных веществ (молекул пенообразователя) на обеих границах раздела жидкость-газ. Согласно теории Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека, устойчивость таких пленок определяется балансом молекулярных сил притяжения (Ван-дер-Ваальсовых) и электростатических сил отталкивания между заряженными адсорбционными слоями.

Движущей силой коалесценции служит градиент капиллярного давления, обусловленный различием кривизны межфазной поверхности пузырьков разного размера. В соответствии с уравнением Лапласа избыточное давление внутри сферического пузыря радиусом R_0 относительно давления в окружающей жидкой фазе определяется кривизной его поверхности:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = \frac{2\gamma}{R_0}, \quad (3.2)$$

где γ – коэффициент поверхностного натяжения на межфазной границе «жидкость-газ». При характерном радиусе мелких пузырьков $R_0 = 100$ мкм и $\gamma = 35$ мН/м избыточное давление составляет $\Delta P = 2 \cdot 0,035 / 10^{-4} = 700$ Па.

В полидисперсной системе это обуславливает возникновение градиента давлений между соседними пузырьками, зависящего от радиусов малого и

большого пузырьков: $\Delta P = 2\gamma(1/R_1 - 1/R_2)$, где $R_1 < R_2$ – радиусы малого и большого пузырьков соответственно. Данный градиент формирует термодинамический потенциал для молекулярной диффузии газа сквозь жидкую пленку по механизму Оствальда, при котором растворенный в жидкости газ перемещается из области повышенного давления в мелких пузырьках в область пониженного давления в крупных. Скорость диффузионного потока газа описывается уравнением массопереноса с учетом закона Генри для растворимости газа:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} = -D \frac{k_H}{RT} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.3)$$

где D – коэффициент диффузии газа в жидкости, C – концентрация растворенного газа, k_H – константа Генри, R – универсальная газовая постоянная.

Данный процесс термодинамически выгоден системе, поскольку приводит к уменьшению суммарной межфазной поверхности и, следовательно, к снижению свободной энергии Гиббса системы на величину $\Delta G = -\gamma\Delta A$, где ΔA – уменьшение площади поверхности раздела фаз.

Кинетика эволюции пенной структуры описывается в рамках молекулярно-кинетической теории устойчивости тонких пленок, согласно которой скорость истончения симметричной плоской пленки определяется гидродинамическим течением жидкости из пленки в окружающий объем под действием капиллярного давления и расклинивающего давления. Уравнение эволюции толщины пленки $h(t)$ в приближении Рейнольдса для ползущего течения имеет вид:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{2h^3}{3\mu R_f^2} [P_c - \Pi(h)], \quad (3.4)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, R_f – радиус пленки, $P_c = 2\gamma/R_0$ – капиллярное давление, $\Pi(h)$ – расклинивающее давление, учитывающее молекулярные взаимодействия в пленке.

Критическая толщина пленки h_{cr} , при которой происходит спонтанный разрыв и слияние пузырьков, определяется условием равновесия $P_c = \Pi(h_{cr})$ и составляет величину $h_{cr} = 20\text{--}60$ нм в зависимости от природы поверхностно-

активных веществ. Количественная оценка свидетельствует, что скорость истончения пленки в концентрированной цементной суспензии зависит не только от вязкости дисперсионной среды, но и от структурно-механических характеристик жидких прослоек, содержащих высокодисперсные твердые частицы. В соответствии с модифицированной моделью Рейнольдса, учитывающей эффективную вязкость μ_{eff} , определяемую по уравнению Эйнштейна–Батчелора для суспензий:

$$\mu_{eff} = \mu_0(1 + 2,5\phi_v + 5,9\phi_v^2), \quad (3.5)$$

где μ_0 – вязкость чистой жидкости, ϕ_v – объемная доля твердой фазы.

В зависимости от водоцементного отношения объемная концентрация цемента находится в пределах $\phi_v = 0,35–0,45$, что приводит к изменению эффективной вязкости системы от $\mu_{eff} = 200–300$ до $800–1200$ мПа·с. Подстановка полученных значений в кинетическое уравнение показывает, что повышение концентрации твердой фазы снижает скорость коалесценции в 2,5–4,0 раза. Дополнительная стабилизация пленок обеспечивается образованием в межпузырьковых перегородках структурированной сетки из коагулирующих частиц цемента и продуктов ранней гидратации, формирующей стерическое препятствие для сближения пузырьков.

Введение полипропиленовой фибры в пенобетонную смесь создает дополнительный механизм подавления коалесценции, связанный с образованием трехмерного волокнистого каркаса. Его формирование изменяет реологические свойства дисперсионной среды и кинетику разрушения межпузырьковых перегородок. Теоретическое описание стабилизирующего действия фибры основывается на четырех взаимосвязанных физических механизмах, реализующихся на различных масштабных уровнях системы.

Первый механизм заключается в стерическом препятствовании сближению пузырьков. При равномерном распределении в объеме цементной суспензии полипропиленовые волокна длиной $l = 6–12$ мм и диаметром $d = 20–100$ мкм формируют пространственную сетку. Характерное расстояние λ

между волокнами зависит от концентрации фибры и для элементов круглого сечения может быть определено из геометрических соотношений:

$$\lambda = l \cdot \sqrt{\frac{\pi d^2}{4V_{\phi}}}, \quad (3.6)$$

где V_{ϕ} – объемная доля фибры в смеси. При дозировке фибры 0,6–1,2 кг/м³ и плотности полипропилена $\rho_{nn} = 910$ кг/м³ объемная концентрация составляет $V_{\phi} = 0,00066–0,00132$, что соответствует среднему расстоянию между волокнами $\lambda = 0,9–1,3$ мм. Данная величина соизмерима с характерным радиусом пузырьков теплоизоляционного пенобетона, равным $r = 0,2–0,8$ мм, что обуславливает высокую вероятность пересечения волокнами межпузырьковых перегородок.

В соответствии со статистической моделью случайного распределения жестких стержней в объеме среднее число волокон, пересекающих сферическую поверхность радиусом R , определяется выражением:

$$N_{\text{пер}} = 2R^2 l \cdot n_{\text{в}}, \quad (3.7)$$

где $n_{\text{в}} = V_{\phi}/(\pi d^2 l/4)$ – числовая плотность волокон. При радиусе пузырька $R = 0,5$ мм, концентрации $V_{\phi} = 0,001$ и длине волокон $l = 12$ мм число пересечений составляет $N_{\text{пер}} \approx 2–3$ волокна на одну перегородку. Каждое из них вызывает локальное утолщение жидкой пленки и препятствует дренированию жидкости, замедляя достижение критической толщины $h_{\text{кр}}$.

Второй механизм связан с увеличением эффективной вязкости дисперсионной среды. Наличие дисперсных анизометричных частиц (волокон) с большим аспектным отношением $l/d = 120–600$ приводит к существенному росту вязкости суспензии. В рамках теории Эйнштейна–Симха для разбавленных суспензий стержнеобразных частиц эффективная вязкость описывается выражением:

$$\eta_{\text{эфф}} = \eta_0 [1 + \nu \cdot V_{\phi} \cdot (l/d)], \quad (3.8)$$

где η_0 – вязкость дисперсионной среды (цементной суспензии без фибры), ν – коэффициент формы частиц ($\nu \approx 0,312$ для хаотически ориентированных цилиндрических стержней при больших значениях l/d).

Для полипропиленовой фибры с $l = 12$ мм, $d = 20$ мкм ($l/d = 600$) и концентрации $V_\phi = 0,001$ относительное увеличение вязкости составляет:

$$\eta_{\text{эфф}}/\eta_0 \approx 1 + 0,312 \cdot 0,001 \cdot 600 \approx 1,19, \quad (3.9)$$

то есть вязкость возрастает на 19 %. При $V_\phi = 0,0015$ прирост вязкости достигает 28 %. Поскольку скорость истончения симметричной жидкой пленки обратно пропорциональна вязкости среды (3.4), замедление коалесценции при указанных концентрациях составляет примерно 1,2–1,3 раза

Следует отметить, что при более высоких концентрациях фибры ($V_\phi > 0,002$) и в областях интенсивных сдвиговых деформаций начинают проявляться эффекты межволоконного взаимодействия, приводящие к структурированию дисперсионной среды и дополнительному росту эффективной вязкости. В этом случае ее зависимость от концентрации описывается нелинейными соотношениями типа уравнения Кригера–Дозрти, учитывающего концентрацию случайной упаковки волокон.

Третий механизм связан с формированием композитных волоконно-цементных структур в межпузырьковых перегородках. Полипропиленовые волокна с развитой удельной поверхностью $S_{\text{уд}} = 150\text{--}200$ м²/кг, выступают центрами адсорбции высокодисперсных частиц цемента с характерным размером 1–50 мкм. Адгезионное взаимодействие на границе «полимер – цементная суспензия» обусловлено силами Ван-дер-Ваальса и электростатическими взаимодействиями. В первом приближении энергию адгезии частицы цемента радиуса $r_{\text{ц}}$ при контакте с поверхностью волокна оценивают выражением:

$$W_{\text{адг}} = -\frac{A_{\text{Н}} \cdot r_{\text{ц}}}{6h_0}, \quad (3.10)$$

где $A_{\text{Н}}$ – константа Гамакера для системы «цемент – вода – полипропилен» ($A_{\text{Н}} \approx 1\text{--}2 \cdot 10^{-20}$ Дж), h_0 – равновесное расстояние между поверхностями ($\approx 0,3\text{--}0,5$ нм). Для частицы радиусом $r_{\text{ц}} = 5$ мкм энергия адгезии составляет $W_{\text{адг}} \approx -1000$ кТ. По модулю это значение существенно превышает тепловую энергию, поэтому частицы надежно закрепляются на поверхности волокна.

Волоконно-цементные агрегаты с эффективным диаметром $d_{эфф} = d + 2r_{ц}$ обладают повышенной устойчивостью к перемещению в межпузырьковых перегородках, поэтому при дренаже жидкости препятствуют локальному накоплению твердой фазы. Локального утончения пленок не происходит, поскольку зоны, служащие критическими областями зарождения разрыва и коалесценции пузырьков, не формируются.

Четвертый механизм – стабилизация толщины межпузырьковых пленок за счет капиллярных эффектов в зоне контакта «волокно-пленка». При пересечении волокном жидкой пленки возникает капиллярный мениск, создающий дополнительное расклинивающее давление, противодействующее истончению. Кривизна мениска, возникающего в зоне трехфазного контакта «газ – жидкость – волокно», определяется краевым углом смачивания θ . Для гидрофобных полипропиленовых волокон ($\theta \approx 90\text{--}110^\circ$) капиллярное давление в мениске:

$$P_{мен} = \frac{2\sigma \cdot \cos(\theta)}{r_{мен}}, \quad (3.11)$$

где $r_{мен}$ – радиус кривизны мениска ($\approx d/2$). При $\theta > 90^\circ$ давление становится отрицательным (создает растягивающее напряжение), что локально увеличивает толщину пленки в окрестности волокна. Характерный радиус области стабилизации составляет $R_{стаб} \approx 3\text{--}5$ диаметров волокна, т.е. $\approx 60\text{--}100$ мкм, что сопоставимо с толщиной межпузырьковых перегородок.

Интегральное влияние дисперсного армирования на кинетику коалесценции может быть описано в рамках модифицированной модели, учитывающей совокупное действие перечисленных механизмов. Эффективная скорость уменьшения толщины межпузырьковой пленки в присутствии фибры:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Pi(h) - p_{cap}}{3\eta_{эфф} \frac{R^2}{h^3}} f_{ст}, \quad (3.12)$$

где $f_{ст} = (1 + \beta \cdot N_{пер})^{-1}$ – коэффициент стерического торможения, учитывающий число пересекающих волокон ($\beta \approx 0,3\text{--}0,5$ – эмпирический параметр, характеризующий эффективность одного волокна). При типичных параметрах

($N_{\text{пер}} = 2, \beta = 0,4, \eta_{\text{эфф}}/\eta_0 = 1,2$) совокупное замедление процесса истончения пленки определяется выражением:

$$\frac{f_{\text{ст}} \cdot \eta_0}{\eta_{\text{эфф}}} \approx \frac{0,56 \cdot 1,0}{1,2} \approx 0,47, \quad (3.13)$$

то есть скорость коалесценции снижается более чем в 2 раза.

Рациональная концентрация фибры выбирается из условия максимизации стабилизирующего эффекта при сохранении требуемой технологичности смеси. Нижняя граница концентрации ($V_{\text{ф, min}}$) соответствует обеспечению среднего числа пересечений $N_{\text{пер}} \geq 1$ для перегородок характерного размера:

$$V_{\text{ф, min}} = \frac{\pi d^2}{8R^2 l}, \quad (3.14)$$

что для $R = 0,5$ мм, $l = 12$ мм, $d = 20$ мкм обеспечивает $V_{\text{ф, min}} \approx 0,00042$ ($\approx 0,4$ кг/м³).

Верхняя граница определяется началом проявления эффектов комкования волокон и чрезмерного роста вязкости, затрудняющего перемешивание и формование смеси. Теоретический анализ показывает, что рациональный диапазон концентрации полипропиленовой фибры составляет $V_{\text{ф}} = 0,0007\text{--}0,0013$ (0,6–1,2 кг/м³), что обеспечивает среднее расстояние между волокнами $\lambda = 1,0\text{--}1,4$ мм и число пересечений $N_{\text{пер}} = 1,5\text{--}3,0$ на перегородку.

Теоретический анализ показывает, что при введении полипропиленовой фибры длиной 6–12 мм в количестве 0,6–1,2 кг/м³ пористая структура получает дополнительную стабилизацию, которая действует совместно с коллоидно-химическими процессами адсорбции поверхностно-активных веществ и формирования расклинивающего давления. Стерический эффект, повышение вязкости, образование композитных структур и капиллярная стабилизация вместе снижают скорость коалесценции в 1,8–2,2 раза. Благодаря этому система достигает стационарного неравновесного состояния на этапе, когда формирующийся твердофазный каркас из продуктов гидратации цемента закрепляет геометрию порового пространства, соответствующую требуемой плотности теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

3.2. Влияние дисперсности цемента на свойства сухой и растворной смеси, затвердевшего раствора

Дисперсность цементного вяжущего определяет реологические характеристики цементного теста, устойчивость пенобетонной смеси в период формования и физико-механические свойства затвердевшего ячеистого бетона. Увеличение удельной поверхности цемента ускоряет процессы гидратации, поскольку возрастает суммарная реакционная поверхность частиц. Для теплоизоляционных пенобетонов это особенно существенно, поскольку прочность межпоровых перегородок определяет несущую способность конструкций.

При помоле образуется ультрадисперсная фракция цемента, способствующая увеличению его водопотребности вследствие роста адсорбционной емкости. Частицы интенсивнее агрегируют, цемент приобретает повышенную склонность к усадке, а состав смеси требует корректировки. Для регулирования реологических характеристик и сроков схватывания применяют химические добавки. Их использование позволяет учитывать изменения, связанные с повышением дисперсности вяжущего.

С целью установления рациональной удельной поверхности портландцемента для изготовления теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона произведен помол цемента в роторно-шаровой мельнице «РШМ-МИКРОН» и изучено распределение частиц по размерам в зависимости от дисперсности вяжущего. Результаты анализа распределения частиц цемента при различной удельной поверхности по размерам представлены в таблице 3.1.

Анализ данных, представленных в таблице 3.1, показывает, что за первые 6 мин помола удельная поверхность цемента возрастает с 300 до 450 м²/кг, а распределение частиц интенсивно смещается в сторону тонкодисперсных фракций. За этот период доля частиц размером 0–5 мкм увеличивается с 8,75 до 22,50 %, содержание фракции 5–20 мкм – с 32,50 до 49,80 %, доля частиц размером 20–100 мкм последовательно снижается.

Таблица 3.1 – Гранулометрический состав цемента при различной удельной поверхности

Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /кг	Продолжительность помола, мин	Фракционный состав, мкм, %				d_{cp} , мкм
		0-5	5-20	20-50	50-100	
300	0	8,75	32,5	45,5	13,25	28,5
350	2	11,25	38,2	42,3	8,25	24,3
400	4	15,80	44,5	34,2	5,50	18,7
450	6	22,50	49,8	24,5	3,20	13,2
500	8	30,15	52,3	15,8	1,75	9,8
600	11	31,50	52,05	16,1	0,35	7,0

При увеличении продолжительности помола до 8 мин удельная поверхность достигает 500 м²/кг, а доля фракции 0–5 мкм повышается до 30,15 %. Продление обработки до 11 мин увеличивает удельную поверхность до 600 м²/кг. Соотношение основных фракций меняется менее выражено, содержание частиц размером до 20 мкм стабилизируется, что отражает изменение характера измельчения, при котором крупные частицы продолжают разрушаться, а высокодисперсные – вторично агрегируются. При тонком помоле эффективность дополнительной механической обработки снижается, поскольку растет поверхностная энергия и усиливается межчастичное взаимодействие.

Произведен анализ распределения по размерам частиц цемента в зависимости от удельной поверхности его частиц, полученных в процессе помола в роторно-шаровой мельнице в соответствии с диапазоном фракций (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Размеры частиц, относящихся к фракциям

Группа	Номера фракций	Диапазон размеров частиц в группе, мкм
I	1–10	0,20–1,48
II	11–20	1,48–11,0
III	21–30	11,0–81,1
IV	31–40	81,1–600

Установлен характер распределения частиц цемента по размерам (рисунок 3.1). При повышении $S_{уд}$ от 300 до 600 м²/кг вклад частиц размером менее 20 мкм закономерно увеличивается с 41,25 до 85,55 %, тогда как доля частиц крупнее 20 мкм уменьшается с 58,75 до 14,45 %.

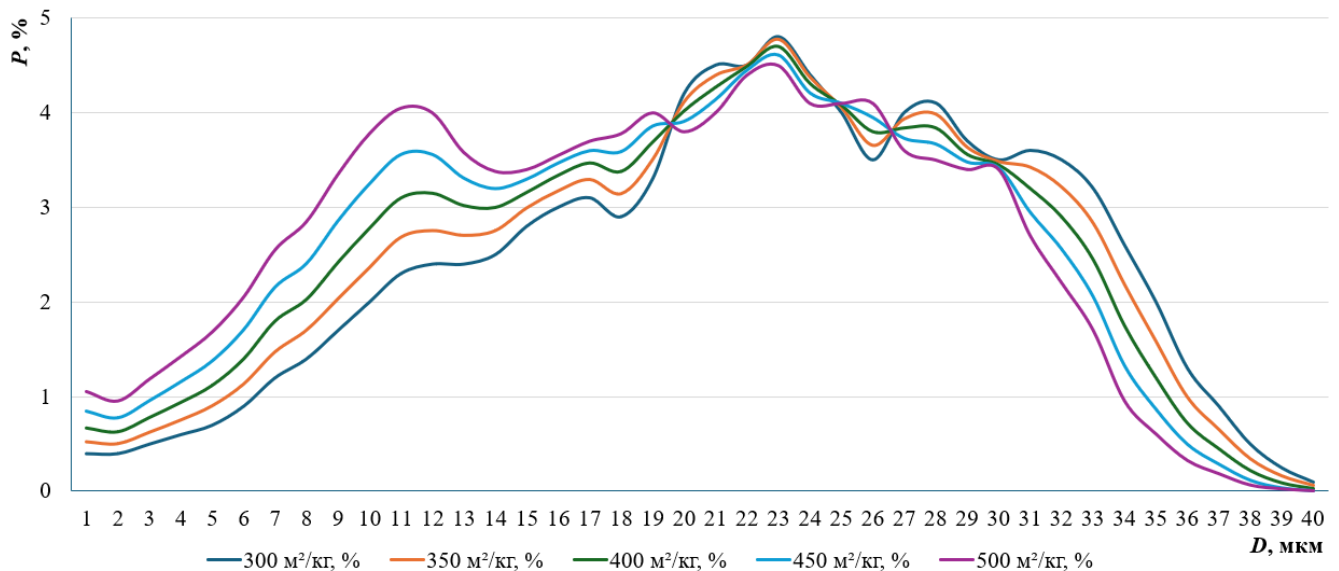


Рисунок 3.1 – Распределение частиц цемента по размерам в зависимости от его удельной поверхности

Для повышения подвижности цементной смеси подобрали рациональный расход суперпластификаторов «Полипласт СП-1» и Elocrete. Эффективность добавок суперпластификаторов оценивали по диаметру растекаемости цементного теста, который определяли методом мини-конуса, и прочности цементного камня при сжатии в возрасте 3 и 28 сут. Результаты растекаемости цементного теста и прочности на сжатие цементного камня от содержания суперпластификаторов «Полипласт СП-1» и Elocrete, приведенные в таблице 3.3, демонстрируют различия в пластифицирующем действии добавок. При введении «Полипласт СП-1» растекаемость постепенно увеличивается во всем исследованном диапазоне дозировок, а Elocrete заметно повышает растекаемость системы уже при содержании от 0,2 %. Это различие связано с механизмами диспергирования цементных частиц. Нафталинсульфонатный суперпластификатор «Полипласт СП-1» действует преимущественно за счет электростатического отталкивания частиц, поликарбоксилатный эфир Elocrete сочетает электростатический и стерический эффекты.

Приведенные в таблице 3.3 данные показывают, что интенсивный рост диаметра расплыва цементного теста для суперпластификатора Elocrete наблюдается в интервале дозировок 0–0,6 % и свидетельствует о достижении точки насыщения при дозировке около 0,5 % от массы цемента. Одновременно при

расходе свыше 0,6 % отмечались первые признаки водоотделения и расслоения теста, а также избыточное воздухововлечение, недопустимые для теплоизоляционного пенобетона ввиду нарушения проектируемой однородности макропористой структуры.

Таблица 3.3 – Результаты растекаемости цементного теста и прочности на сжатие цементного камня от расхода суперпластификаторов «Полипласт СП-1» и Elocrete

Наименование	Расход, %Ц	Растекаемость, мм	Прочность на сжатие, МПа, сут	
			3	28
Суперпластификатор «Полипласт СП-1»	0,1	67	27,9	38,4
	0,2	90	28,3	38,7
	0,3	113	28,6	39,2
	0,4	130	28,9	39,7
	0,5	145	29,2	40,2
	0,6	147	29,5	40,9
	0,7	170	29,7	41,0
	0,8	175	29,9	41,6
Суперпластификатор Elocrete	0,1	70	28,0	38,6
	0,2	90	28,3	39,3
	0,3	115	28,9	40,1
	0,4	135	29,4	40,9
	0,5	170	29,6	41,8
	0,6	210	29,6	41,7

При увеличении дозировки суперпластификатора «Полипласт СП-1» от 0,1 до 0,5 % диаметр расплыва возрастает до 145 мм. При дальнейшем повышении содержания добавки до 0,8 % он достигает 175 мм, достигая значения, полученного с Elocrete при дозировке 0,5 %. Для растекаемости около 170 мм требуется не менее 0,7 % «Полипласт СП-1», что на 0,2 % превышает рациональный расход Elocrete.

Изменение реологических характеристик согласуется с результатами испытаний прочности на сжатие цементного камня. С увеличением расхода обеих добавок прочность при сжатии в возрасте 3 и 28 сут закономерно растет, причем составы с суперпластификатором Elocrete показывают более высокие значения.

Наиболее заметный прирост наблюдается при расходе до 0,5 %, после чего темп повышения прочности снижается. Это подтверждает, что дальнейшее увеличение содержания добавки не приводит к пропорциональному улучшению свойств цементной системы.

По совокупности показателей растекаемости цементного теста и прочности на сжатие цементного камня, а также устойчивости смеси рациональным оказался расход Elocrete, равный 0,5 % от массы цемента, принятый для дальнейших исследований.

Для фиксации структуры теплоизоляционного пенобетона на ранних стадиях определены сроки схватывания цементной смеси с сульфатом алюминия. Сульфат алюминия выполняет функцию безхлоридного ускорителя твердения, интенсифицирующего образование этtringита и гидроалюминатов кальция и, как следствие, сокращающего сроки начала и конца схватывания. Расход сульфата алюминия подбирали с учетом его назначения в качестве ускорителя схватывания и твердения цементного вяжущего. При оценке учитывали продолжительность начального периода структурообразования, сроки начала и конца схватывания цементного теста, его подвижность, прочность цементного камня в раннем и проектном возрасте.

Результаты определения сроков схватывания и прочности на сжатие цементного камня при различном расходе сульфата алюминия представлены в таблице 3.4.

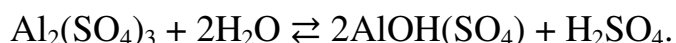
Результаты, представленные в таблице 3.4, демонстрируют, что с увеличением содержания сульфата алюминия цементное тесто закономерно схватывается быстрее. При расходе сульфата алюминия 0,5 % начало схватывания наступает раньше, однако этого ускорения недостаточно для ранней фиксации ячеистой структуры теплоизоляционного пенобетона. Дозировка 1,0 % примерно вдвое сокращает время до начала схватывания по сравнению с контрольным составом, а цементный камень за сутки набирает более высокую прочность. За счет образования этtringита фиксируются пузырьки и снижается вероятность их всплытия, коалесценции и разрушения.

Таблица 3.4 – Результаты определения сроков схватывания и прочности на сжатие цементного камня при различном расходе сульфата алюминия

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, %Ц	Сроки схватывания, мин		Прочность на сжатие, МПа, сут	
	начало	конец	3	28
0	150	220	27,8	38,3
0,5	130	195	35,1	39,3
1,0	100	160	39,5	41,0
1,5	60	110	38,1	40,2
2,0	40	75	36,5	38,8

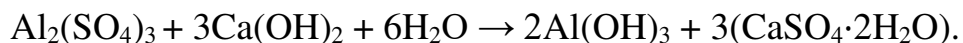
При повышении содержания сульфата алюминия до 1,5–2 % цементное тесто схватывается еще быстрее, однако подвижность заметно снижается. Если коагуляционно-кристаллизационный каркас формируется чрезмерно быстро, времени для приготовления, транспортирования и укладки пенобетонной смеси остается меньше, поэтому сокращается необходимый технологический период.

Сульфат алюминия ускоряет схватывание благодаря последовательному растворению, гидролизу и взаимодействию образующихся соединений алюминия с продуктами гидратации портландцемента. В воде он частично гидролизуется, образуя основные сульфаты алюминия и подкисляя раствор. Этот процесс описывает уравнение:

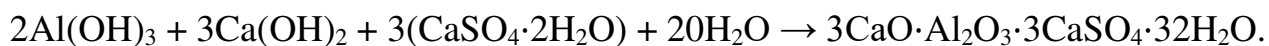


После введения раствора в цементное тесто ионы алюминия попадают в высокощелочную среду. Повышенное содержание гидроксид-ионов смещает равновесие гидролиза в сторону образования гидроксида алюминия, основных сульфатов и гидросульфоалюминатных соединений переменного состава. Первоначально эти продукты могут существовать в виде высокодисперсного гидрозоля, постепенно переходящего в пространственно связанную гелеобразную структуру. Благодаря развитой удельной поверхности гелевая фаза адсорбируется на частицах цемента и способствует их сближению, коагуляции и ускоренному формированию первичного структурного каркаса цементного теста.

Одновременно сульфат алюминия взаимодействует с гидроксидом кальция, образующимся при гидратации силикатных минералов портландцемента. Результатом реакции является формирование аморфного гидроксида алюминия и гидратированного сульфата кальция:



Данная реакция протекает с выделением теплоты, вследствие чего повышается температура системы и дополнительно интенсифицируется гидратация клинкерных минералов. Образовавшиеся аморфный гидроксид алюминия и гипс в присутствии гидроксида кальция далее участвуют в образовании этtringита:



Таким образом, ускорение схватывания связано не с непосредственным воздействием сульфата алюминия на пену, а с интенсификацией реакций в цементной системе. Быстрое образование гидросульфоалюминатных фаз увеличивает объем ранних гидратных новообразований и сокращает продолжительность индукционного периода гидратации. Формирующиеся кристаллы этtringита заполняют пространство между частицами цемента, повышают связность дисперсной системы и ускоряют образование пространственного структурного каркаса, способного фиксировать пузырьки предварительно приготовленной пены.

При повышенных дозировках возможно образование избыточного количества труднорастворимых алюмосодержащих гидратных фаз на поверхности цементных зерен. Такие оболочки затрудняют поступление воды к негидратированным клинкерным минералам, вследствие чего дальнейшая гидратация цемента замедляется. Кроме того, чрезмерное образование этtringита способно вызвать локальные внутренние напряжения и сформировать неоднородную структуру цементного камня, что отрицательно сказывается на его прочности в поздние сроки твердения.

Для количественной оценки влияния дисперсности цемента и химической модификации на реологические свойства цементного теста были исследованы 20 составов (таблица 3.5) при фиксированном В/Ц, различной удельной поверхности частиц цемента и при введении поликарбоксилатного суперпластификатора Elocrete в количестве 0,5 % от массы цемента и сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3$ в количестве 1,0 % от массы цемента.

Таблица 3.5 – Составы цементного теста и его реологические свойства

№ состава	$S_{уд}$, м ² /кг	Elocrete, %Ц	$Al_2(SO_4)_3$, %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

Из данных, представленных в таблице 3.5, следует, что для бездобавочных составов последовательное повышение удельной поверхности цемента в исследованном диапазоне сопровождается закономерным монотонным увеличением нормальной густоты и водоцементного отношения при одновременном сокращении сроков начала и конца схватывания, а также снижении

растекаемости цементного теста. Указанные тенденции обусловлены ростом суммарной удельной поверхности гидратирующихся зерен, что интенсифицирует взаимодействие с водой, повышает водопотребность системы и ускоряет начальные стадии структурообразования. Прочность цементного камня при изгибе и сжатию во всех исследованных возрастах твердения устойчиво возрастает по мере увеличения тонкости помола. При более высокой дисперсности цемента прочность в ранние сроки твердения набирается интенсивнее, поэтому прирост показателей происходит быстрее.

В составах с суперпластификатором Elocrete (таблица 3.5, составы 2, 6, 10, 14, 18) нормальная густота и водоцементное отношение заметно ниже контрольных показателей (составы 1, 5, 9, 13, 17), при этом растекаемость цементного теста закономерно увеличивается, что подтверждает выраженное водоредуцирующее и пластифицирующее действие поликарбоксилатного суперпластификатора. По сравнению с контрольными составами сокращаются сроки начала и окончания схватывания. Такое ускорение связано с присутствием в Elocrete компонента, который ускоряет структурообразование цементного теста. На всех исследованных сроках твердения прочность цементного камня с добавкой превышает контрольные значения, поскольку снижение водоцементного отношения сочетается с сохранением требуемой подвижности смеси.

Для составов с сульфатом алюминия (таблица 3.5, составы 3, 7, 11, 15, 19) характерно наиболее выраженное ускорение схватывания, где сроки начала и конца схватывания сокращаются относительно контрольных значительно сильнее, чем при введении суперпластификатора, и эта закономерность прослеживается во всем диапазоне исследованных значений удельной поверхности. Нормальная густота в этой серии несколько ниже контрольной ввиду связывания части воды в реакциях сульфоалюминатообразования, как и растекаемость. Трехсуточная прочность при введении $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ превышает контрольные значения в наибольшей степени среди всех изученных вариантов модификации, тогда как прирост 28-суточной прочности относительно более умерен, что соответствует перераспределению гидратационного потенциала цемента в пользу ранних сроков твердения.

При совместном введении суперпластификатора Elocrete и сульфата алюминия (таблица 3.5, составы 4, 8, 12, 16, 20) достигается комбинированное влияние добавок на реологические и физико-механические свойства цементного теста. Пластифицирующее действие Elocrete частично компенсирует снижение растекаемости, вызываемое введением сульфата алюминия, при котором растекаемость комплексно-модифицированных составов превышает соответствующие значения составов только с сульфатом алюминия. При этом совместное применение добавок обеспечивает наиболее интенсивное сокращение сроков схватывания, что свидетельствует о сохранении и усилении ускоряющего действия сульфата алюминия в присутствии суперпластификатора.

Обобщая результаты, можно констатировать, что рациональной с точки зрения последующего получения теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения является комплексная модификация цементного вяжущего повышенной дисперсности с одновременным применением поликарбоксилатного суперпластификатора Elocrete и сульфата алюминия: такое сочетание обеспечивает пониженное водоцементное отношение, достаточную подвижность цементного теста и ускоренное формирование кристаллического сростка цементного камня, что является необходимым условием получения устойчивой межпоровой перегородочной матрицы пенобетона с высокими физико-механическими показателями.

3.3. Влияние параметров пенообразующей системы на кратность и стабильность пены

Устойчивость пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона во многом зависит от характеристик пенообразующей системы. В свежееуложенном состоянии предварительно полученная пена формирует размеры, форму и распределение открытых и замкнутых пор. При уменьшении разброса размеров пузырьков, замедлении дренирования и коалесценции структура становится однороднее, а вероятность сегрегации снижается. На эти процессы влияют реологические и поверхностно-активные

свойства раствора, от которых зависят толщина и прочность межпузырьковых перегородок, а также скорость стекания жидкости.

Техническую пену оценивают прежде всего по кратности и стабильности. Кратность показывает, какой объем газонаполненной структуры образуется из единицы объема раствора, а стабильность отражает сохранение формы пузырьков и общего объема пены, ее сопротивление дренированию и водоотделению, в том числе при контакте с цементным тестом. Качественный пенобетон требует пены с кратностью выше 20. Водоотделение в течение 20–30 мин должно оставаться минимальным, поэтому пенообразователь и стабилизирующие добавки выбирают обоснованно.

Для исследования рабочие растворы пенообразователей готовили, разбавляя концентрат водой в соотношениях от 1:50 до 1:20, которым соответствовало содержание пенообразователя 2,0–5,0 мас. %. При нижней границе диапазона получали технически пригодную пену без резкого снижения кратности и ускоренного разрушения. При 5,0 мас. % система достигала практически целесообразного насыщения поверхностно-активными веществами. При превышении 5,0 мас. % кратность возрастала незначительно.

Результаты исследования влияния концентрации пенообразователя на кратность пены представлены на рисунке 3.2.

Данные, приведенные на рисунке 3.2, демонстрируют общую закономерность для всех исследованных пенообразователей. При повышении концентрации с 2,0 до 4,0 % кратность пены возрастает практически монотонно. Такой рост связан с тем, что активные молекулы полнее насыщают поверхность пузырьков, поэтому адсорбционные пленки сильнее стабилизируют пену. Каждый дополнительный процентный пункт в этом диапазоне дает заметную прибавку, благодаря чему система расходует концентрат наиболее эффективно. При дальнейшем повышении концентрации до 5,0 % прирост кратности у всех образцов остается минимальным и составляет 1,6–2,1 % относительно значения при 4,0 %. Это свидетельствует о приближении межфазной поверхности к предельному насыщению.

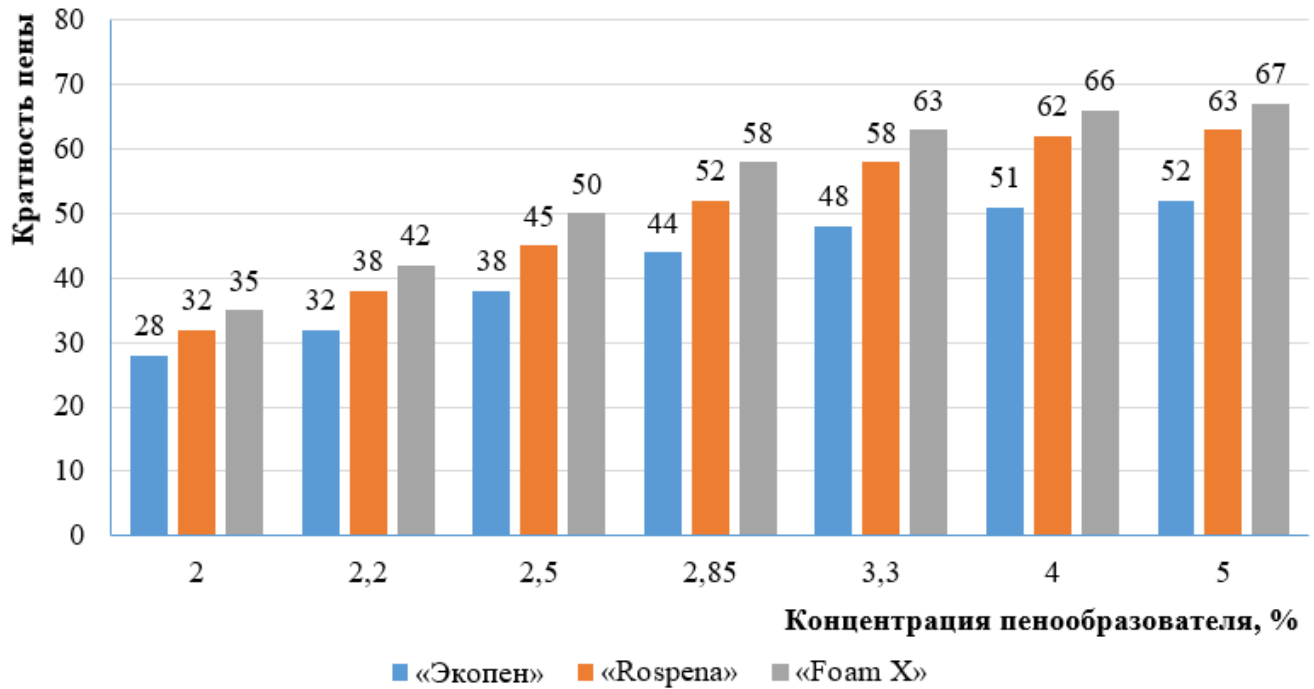


Рисунок 3.2 – Влияние концентрации пенообразователя на кратность пены

В диапазоне концентраций 2,5–4,0 % пенообразователь «Foam X» формирует пену с наибольшей кратностью, превосходя «Экопен» на 26 % и «Rospena» на 8,6 %. Такое соотношение указывает на более эффективное формирование устойчивых межпузырьковых пленок при сопоставимой концентрации пенообразователя. При концентрации 2,0 % различия между составами выражены слабее. «Rospena» обеспечивает кратность около 32, у «Экопена» этот показатель достигает 28, а отставание отдельных образцов от «Foam X» не превышает 10–20 %. Полученные результаты показывают, что различия в составе и структуре белковой части пенообразователей становятся заметнее при концентрации выше 2,5 %.

Рациональным остается диапазон концентраций 2,5–4,0 %, поскольку в нем высокая кратность сочетается с умеренным расходом пенообразователя. При содержании выше 4,0 % система выходит на участок насыщения, и объем пены уже не растет пропорционально количеству введенного концентрата. Дальнейшее увеличение его содержания поэтому становится экономически менее оправданным.

Наряду с кратностью пригодность пены в технологии пенобетона определяет ее устойчивость во времени, момент начала интенсивного водоотделения и

способность пены сохранять объем и структуру в течение периода, сопоставимого со временем схватывания вяжущего. Результаты этих измерений приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Водоотделение пены при различных концентрациях пенообразователя

Пенообразователь	Концентрация, %	Время отделения первой капли, мин	Водоотделение, мл, мин				
			5	10	15	20	30
«Экопен»	2,5	12	8,5	18,2	26,8	34,5	45,3
	3,3	15	6,8	15,1	22,5	29,3	39,8
	4,0	16	6,2	13,8	20,9	27,5	37,2
«Rospena»	2,5	15	6,2	14,5	22,1	28,7	39,8
	3,3	18	4,9	11,8	18,4	24,2	33,5
	4,0	19	4,3	10,7	16,8	22,1	30,8
«Foam X»	2,5	18	4,8	11,3	17,6	23,2	32,4
	3,3	21	3,5	8,9	14,1	18,7	26,3
	4,0	22	3,1	8,1	12,9	17,2	24,5

Согласно данным таблицы 3.6, при увеличении концентрации пенообразователя с 2,5 до 4,0 % устойчивость пены возрастает у всех составов. У пенообразователя «Экопен» время отделения первой капли увеличивается с 12 до 16 мин. К 30-й минуте объем водоотделения при этом уменьшается с 45,3 до 37,2 мл, что соответствует снижению дренирования примерно на 18 %. У пенообразователя «Rospena» наблюдается сходная зависимость: время отделения первой капли возрастает с 15 до 19 мин, а объем отделившейся за 30 мин жидкости сокращается на 20–25%.

Наиболее высокую устойчивость показывает пенообразователь «Foam X». При повышении концентрации с 2,5 до 4,0 % время отделения первой капли возрастает с 18 до 22 мин, поэтому пена дольше сохраняет квазистационарное состояние, а объем водоотделения за 30 мин сокращается с 32,4 до 24,5 мл, что соответствует снижению интенсивности дренирования на 25 %. По совокупности показателей «Foam X» формирует наиболее устойчивую пену во всем исследованном диапазоне концентраций.

Для более детальной количественной оценки стабильности пен, образуемых различными пенообразователями, помимо регистрации времени отделения первой капли и измерения объемов водоотделения через фиксированные интервалы времени ввели систему интегральных показателей. Первый из них – условный интегральный коэффициент стабильности пены, определяемый как отношение времени отделения первой капли к объему жидкости, отделившейся за 30 мин испытаний, отражающий, сколько минут пена сохраняет квазистационарное состояние на единицу объема дренировавшей жидкости. Вторым показателем – средняя интенсивность дренирования, рассчитываемая как отношение прироста объема отделившейся жидкости за интервал с 5 по 30 мин к продолжительности этого интервала, характеризующий установившуюся скорость стекания жидкости из пенного скелета после завершения начальных переходных процессов и по физическому смыслу близок к средней скорости дренирования, применяемой в работах по кинетике стекания белковых пен. Интегральные показатели стабильности пен при различных концентрациях пенообразователя представлены на рисунке 3.3.

Анализ данных, приведенных на рисунке 3.3, показывает, что увеличение концентрации пенообразователя положительно сказывается на интегральных показателях устойчивости пены, где для всех исследованных систем фиксируется последовательный рост стабильности и снижение средней скорости дренирования. Для пенообразователя «Экопен» переход от 2,5 к 4,0 % повышает стабильность на 65 %. Этот прирост связан с усилением стабилизирующей роли адсорбционной пленки. Интенсивность дренирования уменьшается на 16 %, что обусловлено ростом вязкости жидкой фазы и повышением прочности межпузырьковых перегородок. Абсолютные значения остаются наименее благоприятными, что указывает на сравнительно низкую эффективность данного пенообразователя при формировании долговременной пенной матрицы.

При повышении концентрации пенообразователя «Rospena» в тех же пределах стабильность пены возрастает на 63 %, а интенсивность дренирования снижается на 21 %, что связано с сочетанием поверхностно-активных и

вязкоуплотняющих свойств раствора. В диапазоне 2,5–3,3 % у «Rospena» изменения выражены слабее. Стабильность увеличивается на 42 %, интенсивность дренирования уменьшается на 15 %, поэтому зависимость сохраняет нелинейный характер, а максимальная эффективность достигается при концентрации 4,0 %.

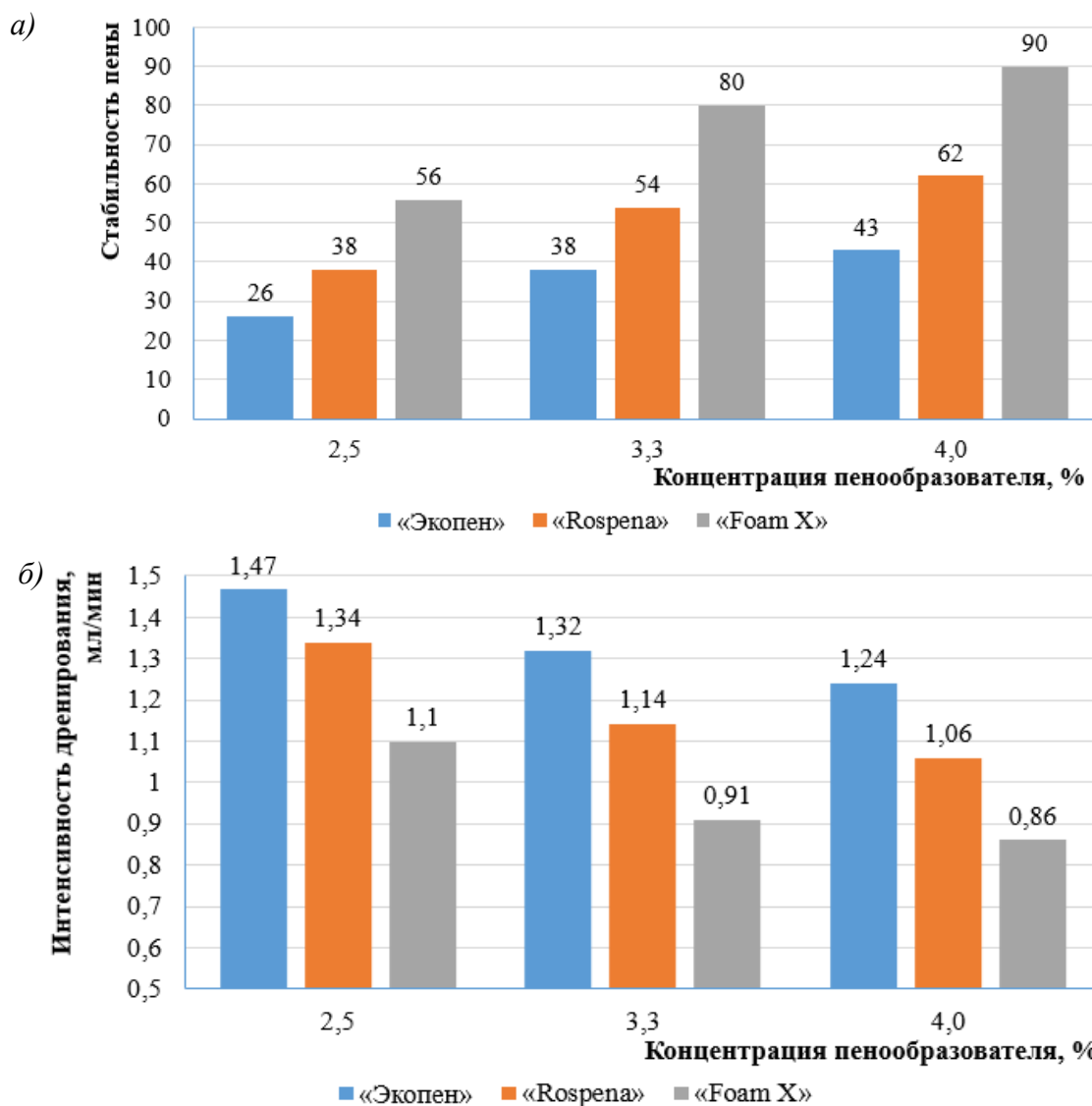


Рисунок 3.3 – Влияние стабильности пены (а) и интенсивности дренирования (б) при различных концентрациях пенообразователей

Наиболее заметные количественные изменения пенообразователь «Foam X» показывает при росте концентрации от 2,5 до 4,0 %, когда стабильность увеличивается на 61 %, а интенсивность дренирования уменьшается на 22 %, что согласуется с высокой эластичностью и низкой проницаемостью белковых пленок, снижающих коалесценцию и дренирование.

Результаты, представленные на рисунке 3.3, демонстрируют, что стабильность пен, полученных с применением различных белковых пенообразователей, заметно различается даже при одинаковой концентрации рабочего раствора. При переходе от 2,5 к 4,0 % у всех составов первая капля отделяется позже, а общий объем водоотделения уменьшается. Сильнее всего эти изменения проявляются у «Foam X», менее выражено – у «Rospena» и минимально у «Экопена». Такая зависимость связана с природой белковой основы, степенью ее модификации и наличием дополнительных стабилизирующих компонентов, поскольку совокупность этих характеристик определяет плотность и эластичность адсорбционных пленок на границе «газ – жидкость», а также устойчивость пены при ее последующем введении в цементное тесто.

Совместимость модифицированной цементной матрицы с предварительно приготовленной технической пеной входит в число рецептурно-технологических факторов, определяющих формирование бездефектной макропористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения. В разделе приведены результаты исследований, направленных на установление закономерностей влияния комплексной модификации цемента на технологические характеристики пены, к которым относятся ее кратность и устойчивость.

Установлено, что поликарбоксилатный суперпластификатор не разрушает предварительно приготовленную техническую пену. Такой результат связан с различием центров адсорбции. Молекулы суперпластификатора преимущественно локализуются на поверхности гидратирующихся цементных зерен и тонкодисперсных минеральных компонентов, расходуясь на диспергирование твердой фазы вяжущего. Поэтому они практически не конкурируют с молекулами пенообразователя за адсорбцию на межфазной границе «жидкость – воздух», на которой формируются стенки пузырьков пены, благодаря чему уже сформированная пенная структура сохраняется.

Экспериментальные данные, полученные другими исследователями, подтверждают зависимость реакции пены на пластифицирующие добавки от их химической природы. Ряд пластификаторов частично или полностью разрушает структуру приготовленной пены, тогда как составы поликарбоксилатного типа сохраняют устойчивую пену, коэффициент использования которой достигает 0,95. При двухстадийном приготовлении теплоизоляционного пенобетона пену и цементную суспензию готовят отдельно, после чего совмещают на завершающем этапе. Добавление суперпластификатора в состав вяжущего обеспечивает требуемую подвижность смеси и при этом не снижает кратность и стойкость пены. Полученные выводы согласуются с результатами исследований [234, 235], согласно которым рациональная дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора повышает совместимость пены с раствором, способствует равномерному и устойчивому распределению пузырьков в объеме цементной суспензии и формирует мелкопористую однородную структуру.

Изучено влияние сульфата алюминия на кратность пены и ее водоотделение с использованием белкового пенообразователя «Foam X» при его содержании 4 %. Результаты этого исследования приведены на рисунке 3.4.

Экспериментальные данные, приведенные на рисунке 3.4, показывают, что сульфат алюминия заметно улучшает характеристики пены. Выраженность этого эффекта существенно зависит от концентрации. На начальном участке кривой, соответствующем содержанию 0,1–0,2 мас. %, стабилизация остается сравнительно слабой. Кратность увеличивается с 66 до 68–70, тогда как объем водоотделения через 20 мин уменьшается на 7,9–18,2 % относительно базового состава.

При концентрации 0,3–0,5 мас. % кратность пены возрастает до 72–75, объем водоотделения через 20 мин уменьшается на 28,1–40,1 % по сравнению с исходным уровнем. Соотношение компонентов близко к оптимальному. Значительная часть молекул пенообразователя вступает во взаимодействие с ионами Al^{3+} , поэтому адсорбционная пленка уплотняется и упрочняется, что существенно замедляет дренирование жидкой фазы.

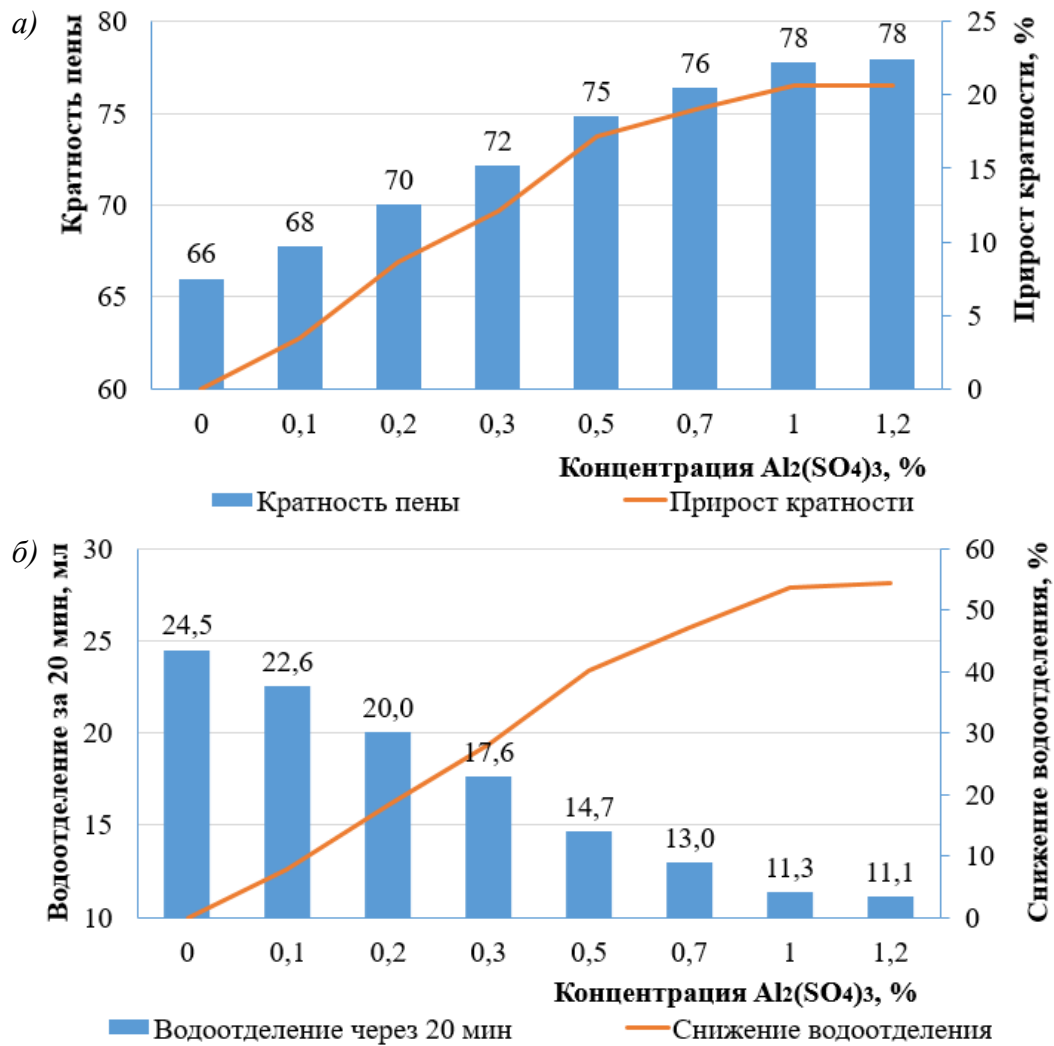


Рисунок 3.4 – Влияние концентрации сульфата алюминия на свойства пены: *а* – кратность; *б* – водоотделение за 20 мин

Наибольшая стабильность пены достигается при содержании сульфата алюминия около 0,7–1,0 мас. %. В пределах этого интервала кратность увеличивается с исходных 66 до 76–78, а объем водоотделения спустя 20 мин уменьшается на 53,7 % относительно базового значения. После этого система выходит на плато по эффективности. При содержании $Al_2(SO_4)_3$ свыше 1,0 % кратность практически перестает расти, и объем водоотделения больше не сокращается, поскольку межфазная поверхность уже насыщена комплексами «белок – Al^{3+} ». Избыток коагулирующей добавки при таких условиях не находит новых центров связывания. Резкого падения кратности или ускоренного разрушения пены в рассматриваемом диапазоне концентраций не происходит.

Белковые компоненты пенообразователя частично связывают избыточные ионы алюминия, благодаря чему коллоидная система сохраняет устойчивость.

Стабилизирующее действие сульфата алюминия на свойства пены обусловлено несколькими взаимосвязанными процессами, которые укрепляют межфазные пленки и повышают устойчивость пенной структуры. Ионы Al^{3+} связываются с карбоксильными, аминными и гидроксильными группами белковых молекул, образуя координационные, в том числе хелатные, комплексы. Эти комплексы прочно удерживаются на межфазной границе «газ–жидкость», повышая прочность и вязкоупругие характеристики адсорбционной пленки. При частичном гидролизе $Al_2(SO_4)_3$ в водной среде появляются коллоидно-дисперсные частицы гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ и основных солей. Частицы проникают в жидкие прослойки между пузырьками и создают армирующий каркас, который препятствует истончению и разрыву межпузырьковых перегородок. Координационное связывание и коллоидно-механическое армирование действуют совместно, поэтому перегородки лучше противостоят дренированию и локальным возмущениям, которые возникают, когда давление меняется и пенная структура деформируется.

Описанный механизм объясняет установленное экспериментально снижение водоотделения при умеренном увеличении кратности пены под воздействием сульфата алюминия, вводимого как добавка к цементу. При содержании $Al_2(SO_4)_3$ до 1,0 мас. % формируется пена, сочетающая высокую газонаполненность и длительную устойчивость, что способствует последующему образованию однородной пористой структуры пенобетона.

3.4. Влияние геометрических параметров полипропиленовой фибры на пористую структуру теплоизоляционного пенобетона

3.4.1. Подбор типоразмеров полипропиленовой фибры

Перед проведением исследования влияния геометрических параметров полипропиленовой фибры на пористую структуру теплоизоляционного пенобетона был выполнен предварительный сравнительный эксперимент с целью установления рационального сочетания видов и длин полипропиленовой

фибры [236-238]. Прочность контрольных образцов без фибры составила 64,0 МПа на сжатие и 8,8 МПа при изгибе (таблица 3.5). Результаты испытаний приведены в таблицах 3.7 и 3.8.

Таблица 3.7 – Прочность на сжатие цементных образцов с полипропиленовой фиброй различных видов и длин, МПа

Расход фибры, кг/м ³	Прочность на сжатие цементных образцов, МПа				
	Фибра I (6 мм)	Фибра II (6 мм)	Фибра II (9 мм)	Фибра I (12 мм)	Фибра II (12 мм)
0,0	64,0	64,0	64,0	64,0	64,0
0,3	64,8	64,5	64,8	65,2	65,0
0,6	66,3	66,0	66,7	67,2	66,3
0,9	67,8	67,3	68,2	68,8	68,3
1,2	69,0	68,7	69,7	70,9	70,3
1,5	68,2	68,0	69,0	69,2	69,7

Таблица 3.8 – Прочность при изгибе цементных образцов с полипропиленовой фиброй различных видов и длин, МПа

Расход фибры, кг/м ³	Прочность при изгибе цементных образцов, МПа				
	Фибра I (6 мм)	Фибра II (6 мм)	Фибра II (9 мм)	Фибра I (12 мм)	Фибра II (12 мм)
0,0	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
0,3	9,5	9,5	9,6	10,0	9,8
0,6	10,3	10,3	10,6	11,1	11,0
0,9	11,3	11,1	11,8	12,6	12,3
1,2	12,1	12,0	12,8	14,3	13,9
1,5	13,3	13,0	14,1	15,9	15,4

Результаты, приведенные в таблице 3.7, показывают общую для всех исследованных типоразмеров полипропиленовой фибры тенденцию. При увеличении расхода армирующей добавки с 0,3 до 1,2 кг/м³ прочность на сжатие возрастает, после чего при дозировке 1,5 кг/м³ наблюдается снижение. Контрольный состав цементного камня без фибры сохраняет стабильный уровень

прочности, тогда как введение волокон фибры повышает несущую способность цементной матрицы. Во всех вариантах максимальная прочность на сжатие достигается при расходе $1,2 \text{ кг/м}^3$. Такая дозировка соответствует рациональному уровню дисперсного армирования материала на сжатие.

Сопоставление типоразмеров показывает, что при одинаковом расходе увеличение длины волокна с 6 до 12 мм сопровождается дополнительным приростом прочности (таблица 3.7). Наиболее высокие показатели среди всех исследованных вариантов получены при использовании более длинных волокон. Такая зависимость связана с формированием разветвленной пространственной армирующей сетки, которая эффективнее перераспределяет напряжения в объеме материала и препятствует развитию микротрещин. При переходе к максимальной рассматриваемой при дозировке $1,5 \text{ кг/м}^3$ прочность немного снижается, однако остается выше контрольного уровня. Снижение связано с началом образования избыточной концентрации волокон, из-за которой уплотнение матрицы несколько затрудняется. Резкое падение прочности на сжатие при этом отсутствует, что указывает на равномерное распределение фибры и отсутствие агломерации даже при повышенном содержании.

Результаты испытаний прочности цементного камня при изгибе, приведенные в таблице 3.8, демонстрируют более выраженную и устойчивую закономерность. Прочность монотонно возрастает во всем исследованном диапазоне расходов и достигает максимума при дозировке $1,5 \text{ кг/м}^3$. Подобное изменение прочности при изгибе связано с тем, что дисперсное армирование наиболее эффективно работает в зоне растяжения. Длинные волокна препятствуют трещинообразованию и перераспределяют растягивающие напряжения, благодаря чему волокно обеспечивает значительный относительный прирост прочности на изгиб, существенно превосходящий эффект при прочности на сжатие.

Сравнение результатов (таблица 3.8) подтверждает определяющее влияние длины волокна на эффективность армирования при изгибе. Наибольший прирост прочности обеспечивают волокна длиной 12 мм, тогда как волокна длиной 6 мм обеспечивают минимальный, но устойчиво положительный эффект. Волокна

промежуточной длины, равной 9 мм, занимают закономерное положение между этими вариантами. Различия между типами фибры одинаковой длины связаны с разницей в модуле упругости и адгезионном взаимодействии волокон с цементной матрицей. Полученные данные показывают, что при сжатии рациональная дозировка составляет около $1,2 \text{ кг/м}^3$, при изгибной нагрузке прочность продолжает возрастать до $1,5 \text{ кг/м}^3$. В обоих случаях решающим фактором остается длина применяемого волокна.

По данным микроструктурного анализа образцов (рисунки 3.5 и 3.6), волокна полипропиленового волокна встраиваются в цементный камень по разным механизмам.

Микроструктурный анализ поверхности полипропиленовой фибры показал, что после твердения цементной смеси полипропиленовые волокна сохраняют геометрическую целостность. В зоне их контакта с цементной матрицей формируются гидратные новообразования, среди которых преобладают низкокristаллический гидросиликатный гель C–S–H и кристаллы портландита, наличие которых указывает на развитие минерализованной переходной зоны на границе раздела «полипропиленовая фибра – цементный камень».

Поскольку полипропилен отличается химической инертностью, неполярностью и гидрофобностью, а его поверхностная энергия относительно низка, водная цементная суспензия смачивает поверхность волокна ограниченно, и прочные химические связи с продуктами гидратации цемента формируются в недостаточной степени. Адгезия полипропиленовой фибры к цементной матрице в этих условиях носит преимущественно физико-механический характер.

При гидратации цемента гидратные новообразования осаждаются у поверхности фибры, частично заполняют ее микронеровности и локальные углубления. Благодаря этому увеличивается фактическая площадь контакта армирующего элемента с твердеющей матрицей. Слой C–S–H-геля уплотняет контактную зону, ограничивает свободное относительное перемещение волокна в цементном камне и тем самым усиливает его фиксацию. Кристаллические новообразования портландита и других гидратных фаз образуют локальные

участки механического зацепления, повышая сопротивление сдвигу по границе раздела фаз, в контактной зоне формируется минерализованная оболочка.

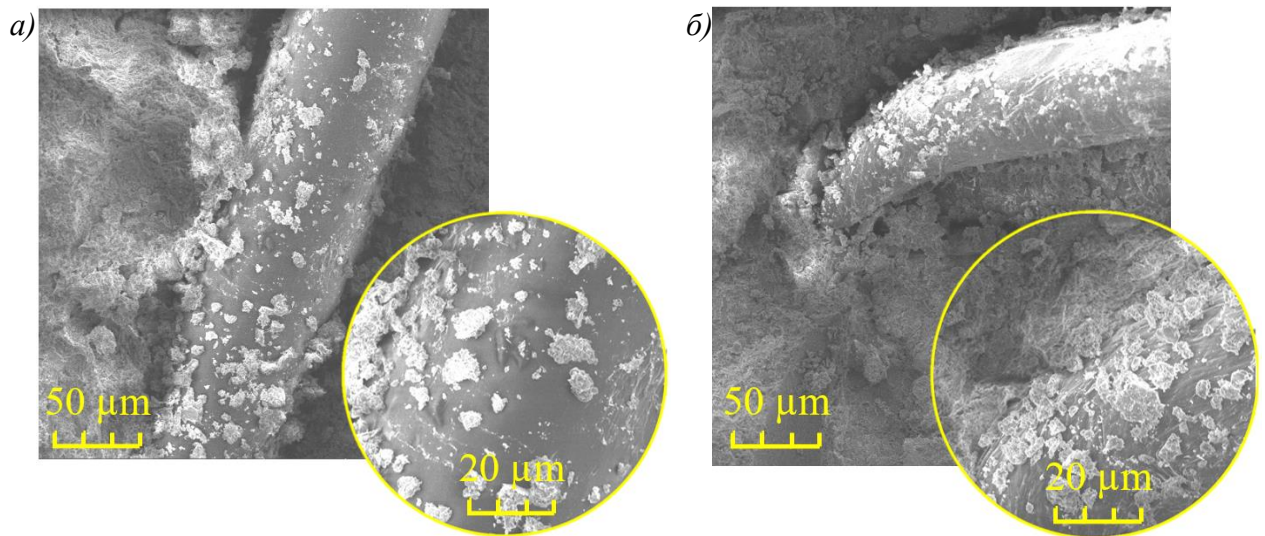


Рисунок 3.5 – Микроструктура цементного камня с полипропиленовой фиброй I различной длины: *a* – 6 мм; *б* – 12 мм

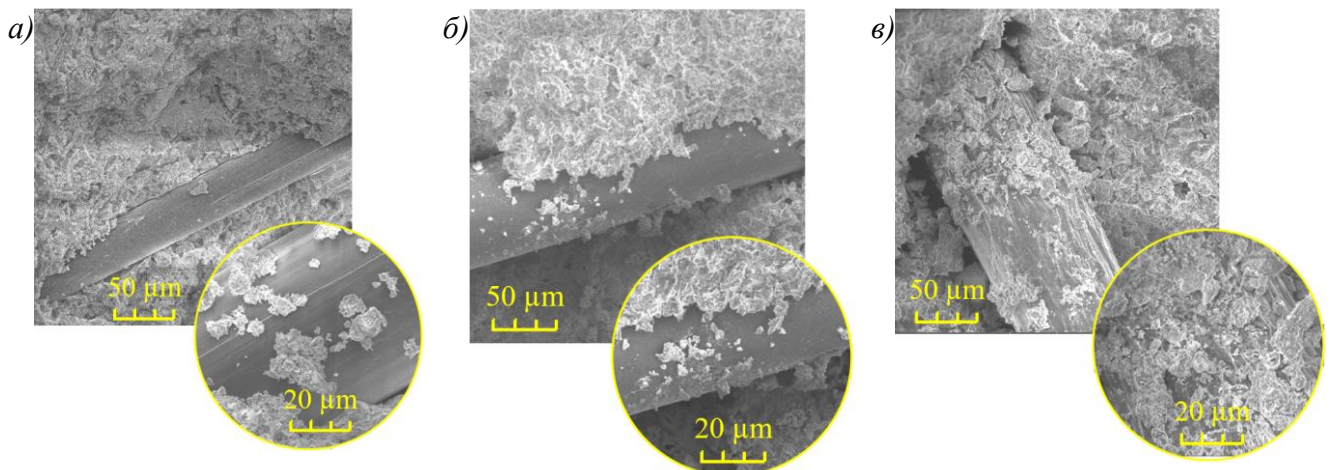


Рисунок 3.6 – Микроструктура цементного камня с полипропиленовой фиброй II различной длины: *a* – 6 мм; *б* – 9 мм; *в* – 12 мм

Таким образом, присутствие C–S–H-геля и портландита на поверхности полипропиленовой фибры свидетельствует о формировании физически связанной минерализованной контактной зоны, которая обеспечивает механическое зацепление и фрикционное сцепление волокна с цементной матрицей. Полипропиленовое волокно сохраняет целостность в исследуемый период твердения, что подтверждает ее устойчивость к щелочной среде цементного камня.

Полученные результаты позволили обосновать выбор типоразмеров для основного исследования. Для фибры I выбраны волокна длиной 6 и 12 мм, поскольку они обеспечивают наилучший показатель прочности при изгибе и сохраняют стабильное поведение материала при сжатии в условиях повышенного расхода фибры. Также для дальнейших исследований выбраны волокна полипропиленовой фибры II длиной 12 мм, поскольку они обеспечивают нарастающий эффект структурной стабилизации пористого каркаса материала.

3.4.2. Влияние длины полипропиленовой фибры на параметры пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Чтобы выявить различия влияния длины волокна на параметры пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона, подготовили образцы марки по средней плотности $D300$ по средней плотности с фиброй I длиной 6 и 12 мм и фиброй II длиной 12 мм. Расход полипропиленовой фибры для дисперсного армирования составлял $0,3\text{--}1,2\text{ кг/м}^3$ с шагом $0,3\text{ кг/м}^3$, а для дисперсного армирования полипропиленовой фиброй с установленными геометрическими параметрами дополнительно подготовили образцы с различными соотношениями волокон указанных длин.

В данном исследовании марка пенобетона по средней плотности $D300$ выбрана из-за ее промежуточного положения в типоряду теплоизоляционных неавтоклавных пенобетонов, между сверхлегкими составами с минимальной прочностью межпоровых перегородок и конструкционно-теплоизоляционными пенобетонами повышенной плотности. Такое положение обеспечивает наиболее контрастное проявление стабилизирующего эффекта дисперсного армирования, сохраняя высокую практическую значимость результатов для производства теплоизоляционных изделий и монолитных засыпок. Параметры пористой структуры оценивали комплексно, выполняя количественный анализ микроструктуры с использованием авторской программы определения параметров пористости ячеистых бетонов [223].

Результаты исследования влияния длины волокна на параметры пористой структуры дисперсно-армированного пенобетона представлены на рисунке 3.7.

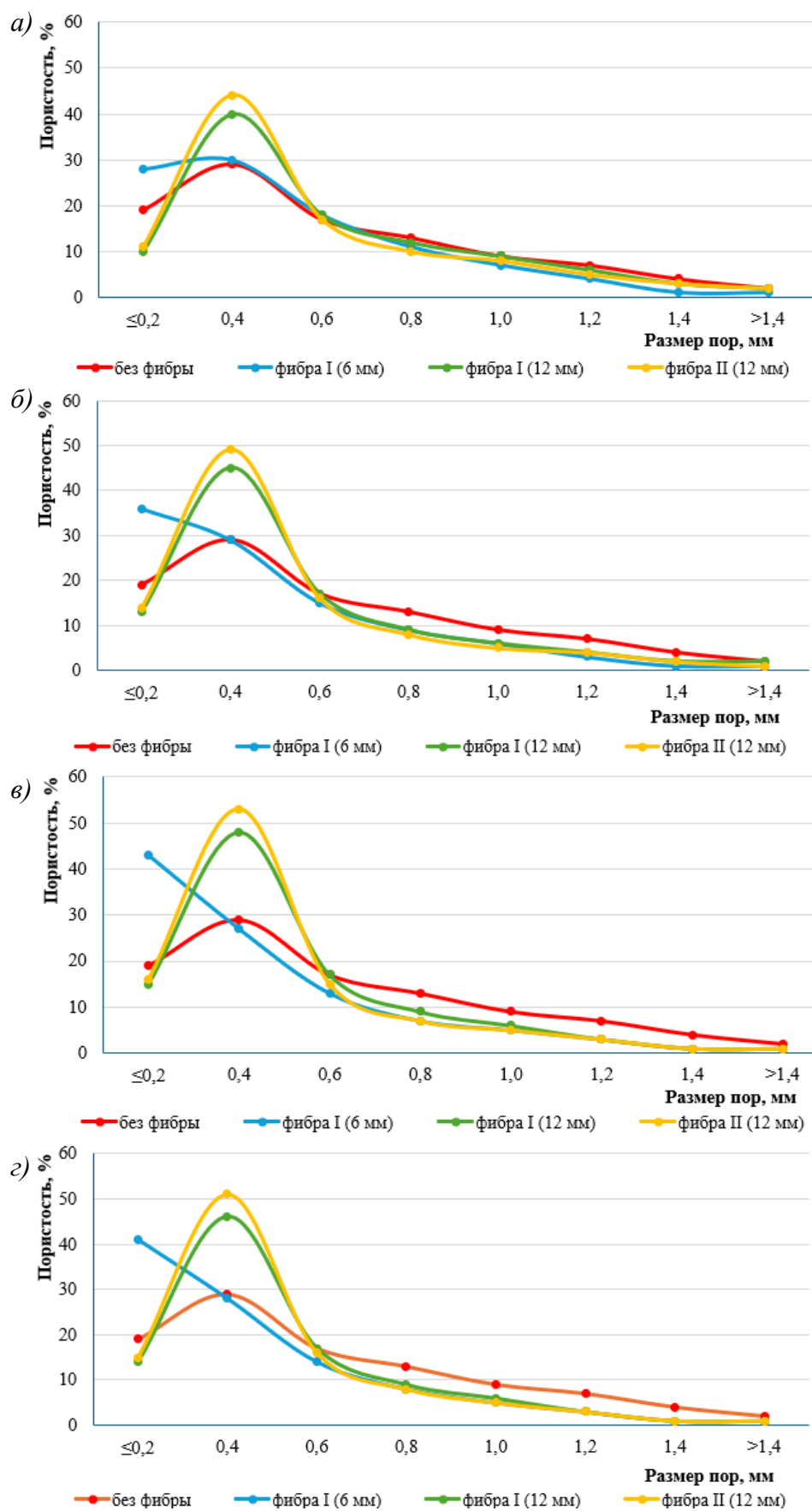


Рисунок 3.7 – Влияние длины полипропиленового волокна на пористость дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности $D300$ при расходе полипропиленовой фибры: а – $0,3 \text{ кг/м}^3$; б – $0,6 \text{ кг/м}^3$; в – $0,9 \text{ кг/м}^3$; г – $1,2 \text{ кг/м}^3$

При минимальном расходе полипропиленовой фибры $0,3 \text{ кг/м}^3$ (рисунок 3.7, а) данные показывают, что структурная стабилизация у всех типоразмеров волокна выражена слабо: для полипропиленовой фибры I длиной 6 мм доля пор размером менее 0,2 мм возрастает с 19 % в контрольном образце до 28 %, тогда как у более длинных волокон фибры максимум распределения умеренно смещается в диапазон 0,2–0,4 мм и достигает 40–44 %. В структуре по-прежнему сохраняется заметная доля пор размером 0,8–1,4 мм, поэтому плотности волокон в объеме материала недостаточно для формирования устойчивых барьеров, эффективно подавляющих коалесценцию пузырьков на ранней стадии вспенивания.

При увеличении расхода полипропиленовой фибры до $0,6 \text{ кг/м}^3$ эффект стабилизации заметно усиливается по сравнению с расходом $0,3 \text{ кг/м}^3$ (рисунок 3.7, б). Доля мелких пор существенно возрастает для всех типоразмеров волокна и достигает 36 % для фибры I длиной волокон 6 мм, 45 % для фибры I длиной волокон 12 мм и 49 % для фибры II длиной волокон 12 мм в соответствующих характерных диапазонах, тогда как суммарная доля крупных пор размером более 1,0 мм сокращается почти вдвое относительно расхода $0,3 \text{ кг/м}^3$, что отражает переход от разрозненного распределения волокон к формированию более плотной пространственной сетки, ограничивающей подвижность и слияние пузырьков в объеме пенобетонной смеси.

По результатам исследования рациональным признан расход $0,9 \text{ кг/м}^3$, при котором для всех исследованных типоразмеров фибры зафиксированы максимальные значения доли мелких пор (рисунок 3.7, в), причем для фибры I длиной 6 мм доля пор менее 0,2 мм составила 43 %, для фибры I длиной 12 мм доля пор размером 0,2–0,4 мм достигла 48 %, для фибры II длиной 12 мм доля пор в том же диапазоне достигла 53 % (рисунок 3.7, в). При таком расходе доля крупных пор достигла минимального уровня во всем исследованном диапазоне при размерах пор более 1,4 мм для всех составов с фиброй против 2 % в контрольном составе, что свидетельствует о наиболее эффективном подавлении коалесценции пузырьков и

формировании однородной ячеистой структуры. Данные предварительного эксперимента (п. 3.4.1) дополнительно подтверждают выбор расхода $0,9 \text{ кг/м}^3$, поскольку именно в этом диапазоне зафиксирован устойчивый прирост прочности на сжатие и при изгибе без признаков агломерации волокон.

Дальнейшее увеличение расхода до $1,2 \text{ кг/м}^3$ не улучшает параметры пористой структуры (рисунок 3.7, *з*). Для всех типоразмеров фибры доля мелких пор, по сравнению с расходом $0,9 \text{ кг/м}^3$, снижается на 1–2 %. Такое снижение связано с избыточным содержанием волокон в объеме смеси. Волокна распределяются менее равномерно, в отдельных участках возникают локальные скопления.

При рациональном расходе полипропиленовой фибры $0,9 \text{ кг/м}^3$ составы пенобетона с разной длиной волокна по-разному изменяют морфологию пористости, поэтому их сопоставление позволяет установить дифференцированный характер такого влияния. Фибра I длиной 6 мм обеспечивает максимальный сдвиг в область субкапиллярных пор размером менее 0,2 мм, поскольку наиболее короткие волокна при высокой объемной плотности распределения встраиваются непосредственно в пленочные оболочки пузырьков и тонкие межпоровые перегородки, обеспечивая локальную стабилизацию структуры пенобетона. Волокна увеличенной длины, представленные фиброй I и фиброй II длиной 12 мм, формируют выраженный максимум в диапазоне 0,2–0,4 мм при минимальной доле крупных пор. Такой результат свидетельствует о формировании протяженного пространственного каркаса, который ограничивает перемещение и слияние пузырьков в пределах всего объема пенобетона, включая отдельные локальные зоны.

На рисунке 3.8 представлена микроструктура контрольного состава пенобетона без армирования и составов с полипропиленовым волокном различной длины.

Микрофотография контрольного состава пенобетона без армирования (рисунок 3.8, *а*) демонстрирует характерную картину интенсивной коалесценции пузырьков: наблюдаются крупные поры неправильной формы, образовавшиеся в

результате слияния первичных пузырьков. Межпоровые перегородки имеют неравномерную толщину от 40 до 180 мкм, отмечаются участки с разрушенными перегородками и образованием сегментных пузырей.

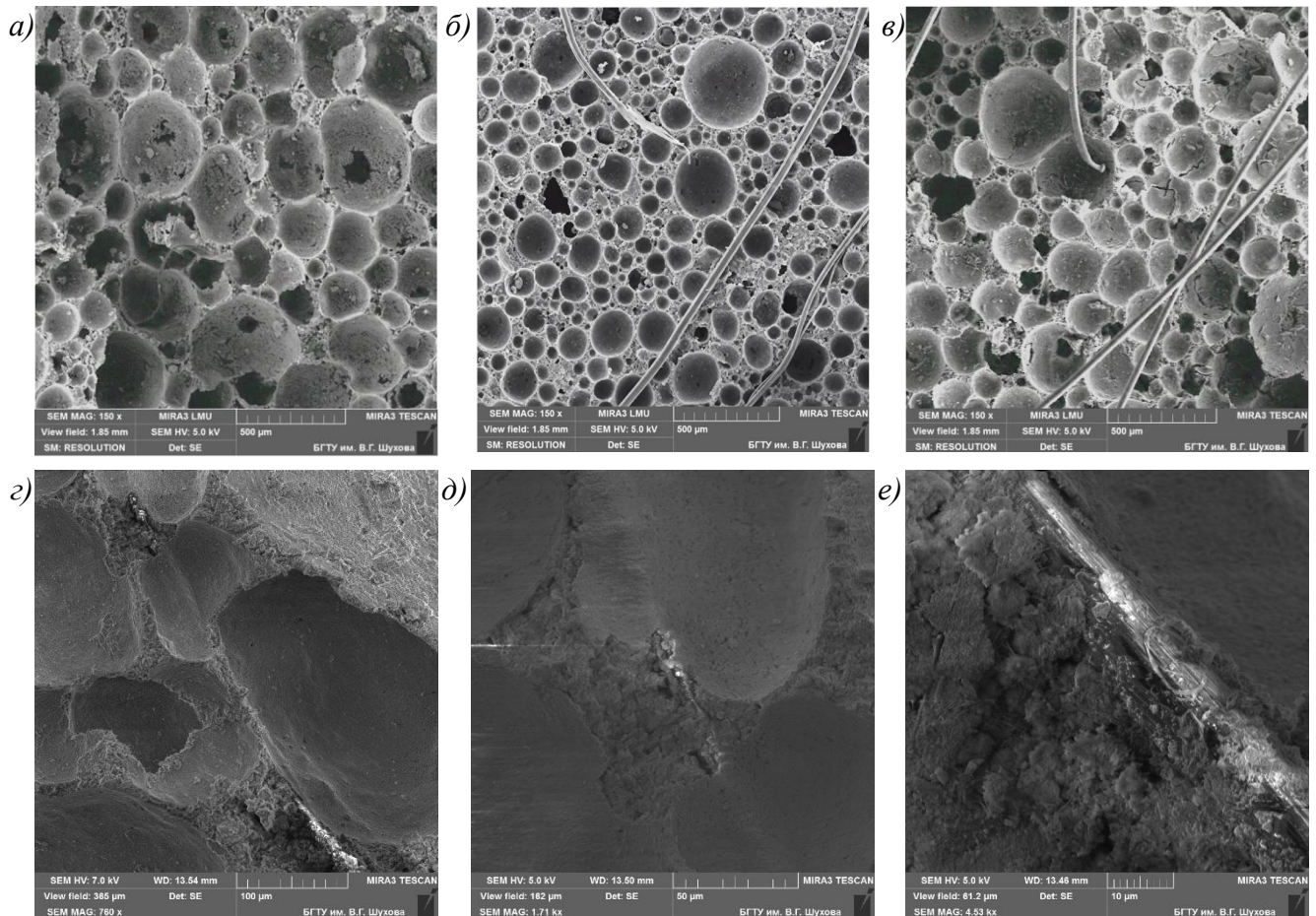


Рисунок 3.8 – Микроструктура пенобетона марки по средней плотности $D300$: а – без фибры; б – с фиброй I длиной 6 мм; в – с фиброй I длиной 12 мм; г-е – встраивание волокна в межпоровую перегородку

При введении полипропиленового волокна длиной 6 мм (рисунок 3.8, б) пористая структура пенобетона получает выраженную стабилизацию уже на стадии формирования материала. Полипропиленовые волокна наблюдаются в структуре в виде светлых нитевидных включений, преимущественно расположенных в пленочных оболочках пузырьков и тонких межпоровых перегородках (рисунок 3.8, г-е). Поры сохраняют устойчивую структуру. Поверхность полипропиленовых волокон в цементной матрице выглядит преимущественно гладкой, хотя на отдельных участках она покрыта тонким слоем гидратных продуктов, включая С-S-H-гель и кристаллы гидроксида кальция,

которые формируют межфазную переходную зону. Микроструктура состава пенобетона с волокнами длиной 12 мм (рисунок 3.8, в) демонстрирует образование пространственного каркаса с расстоянием 1,2–1,8 мм между соседними элементами. Длина волокон соответствует 8–10 средним диаметрам пор, поэтому каждое волокно пересекает 6–8 соседних межпоровых перегородок и формирует протяженные связи внутри объема материала. Формируется высокоорганизованная структура дисперсно-армированного пенобетона с преобладанием сферических пор. Пространственный каркас, сформированный длинными волокнами, ограничивает подвижность пузырьков в объеме пенобетонной смеси, препятствуя их сближению и последующему слиянию.

Результаты исследований теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности $D300$ показали, что рациональный расход полипропиленовой фибры составляет $0,9 \text{ кг/м}^3$. При таком содержании волокна достигается максимальная стабилизация пористой структуры для всех исследованных типоразмеров фибры. При этом длина волокна по-разному влияет на морфологию пористости: волокна длиной 6 мм локально упрочняют межпоровые перегородки, тогда как волокна длиной 12 мм формируют пространственный несущий каркас, ограничивающий коалесценцию пузырьков в объеме пенобетонной смеси.

3.4.3. Синергетический эффект и кинетика коалесценции при комбинированном дисперсном армировании пенобетона

С целью выявить синергетический эффект дисперсного армирования пенобетона полипропиленовым волокном с установленными геометрическими параметрами, исследовали образцы пенобетона с дисперсным армированием полипропиленовой фиброй с длиной волокон 6 и 12 мм в разных соотношениях. Общее содержание полипропиленовой фибры во всех составах составляло $0,9 \text{ кг/м}^3$. Влияние соотношения полипропиленовых волокон длиной 6 и 12 мм на распределение пор дисперсно-армированного пенобетона по размерам приведено в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Влияние соотношения полипропиленовых волокон длиной 6 и 12 мм на распределение пор дисперсно-армированного пенобетона по размерам

Состав	Размер пор, мм*																d_{cp} , мкм	
(6 мм : 12 мм)	<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	2,0	631	610
90:10	22,0	22,8	31,2	31,8	18,0	18,3	12,5	12,6	7,5	6,9	4,3	3,9	2,6	1,9	1,8	1,7	620	600
80:20	22,4	23,2	31,1	31,6	18,3	18,7	12,6	12,7	7,5	6,9	4,1	3,8	2,5	1,8	1,5	1,3	609	590
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
60:40	23,5	24,3	30,7	31,2	18,9	19,3	12,7	12,7	7,1	6,6	3,9	3,5	2,2	1,7	1,3	1,1	582	568
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
40:60	24,7	25,5	30,4	31,0	19,5	19,7	12,6	12,5	6,6	6,2	3,4	3,0	1,9	1,3	1,0	0,9	550	543
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
20:80	25,0	25,5	30,3	31,1	19,5	19,8	12,6	12,5	6,5	6,2	3,4	3,0	1,8	1,2	1,0	0,8	540	533
10:90	24,2	25,0	30,5	31,1	19,3	19,5	12,7	12,6	6,8	6,3	3,7	3,3	1,8	1,3	1,1	0,8	547	537
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)

Экспериментальные данные, приведенные в таблице 3.9, показывают, что комбинированное применение волокон разной длины обеспечивает более эффективную стабилизацию пористой структуры по сравнению с моноармированием. При массовом соотношении волокон длиной 6 и 12 мм, равном 30:70, средний диаметр пор достигает минимального значения 530 мкм, доля укрупненных пор снижается до минимальных 5,8 %.

Синергетический эффект комбинированного армирования возникает благодаря взаимодополняющему действию двух типов длин волокон, которые стабилизируют пенобетонную смесь на разных уровнях. Волокна длиной 6 мм составляют 30 % массы. Они встраиваются в пленочные оболочки и межпоровые перегородки, формируя локальные барьеры для коалесценции. Волокна длиной 12 мм составляют 70 % массы и образуют пространственный каркас, ограничивающий подвижность пузырьков во всем объеме смеси. При таком соотношении достигается высокая локальная плотность микробарьеров, а плотная пространственная сетка препятствует перемещению пузырьков.

Состав дисперсно-армированного пенобетона при соотношении волокон 50:50 также демонстрирует высокую эффективность. Средний диаметр пор достигает 566 мкм, доля укрупненных пор равна 5,7 %. Когда доля волокон длиной 6 мм возрастает до 70 % (соотношение 70:30), параметры структуры ухудшаются из-за недостаточно плотного пространственного каркаса, который формируют длинные волокна. Применение волокон длиной 6 мм (100:0), эффективность снижается, средний диаметр пор увеличивается до 598 мкм, доля укрупненных пор достигает 6,6 %.

Следует отметить, что состав дисперсно-армированного пенобетона с соотношением волокон 30:70 превосходит по параметрам пористой структуры даже моноармирование длинными волокнами (0:100), несмотря на меньшее абсолютное количество волокон длиной 12 мм. Это подтверждает наличие синергетического эффекта комбинированного армирования, где добавление даже относительно небольшого количества волокон длиной 6 мм существенно повышает эффективность стабилизации пористой структуры за счет локального упрочнения межпоровых перегородок, которые уже стабилизированы пространственным каркасом из волокон длиной 12 мм.

Схема механизмов влияния полипропиленовых волокон различной длины на структуру пенобетона представлена на рисунке 3.9.

Как видно из рисунка 3.9, а, волокна длиной 6 мм преимущественно встраиваются в тонкие пленочные оболочки пузырьков и межпоровые перегородки, увеличивая их локальную прочность и препятствуя разрыву. Механизм действия основан на создании микробарьеров, которые замедляют диффузию газа через пленки и механически упрочняют тонкие участки, наиболее подверженные разрушению при коалесценции. Однако длина не позволяет волокнам формировать протяженные связи между удаленными порами, что ограничивает их армирующую функцию.

Волокна длиной 12 мм образуют трехмерный пространственный каркас, который пронизывает объем материала и объединяет множественные межпоровые перегородки в единую систему (рисунок 3.9, б). Благодаря этому каркасу

локальные напряжения перераспределяются по объему пенобетона, развитие магистральных трещин замедляется, а конструктивная целостность материала сохраняется при действии внешних нагрузок. Основное армирующее действие волокон проявляется после затвердевания пенобетона. На стадии формирования структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона их стабилизирующий эффект волокон выражен слабее из-за меньшей плотности распределения.

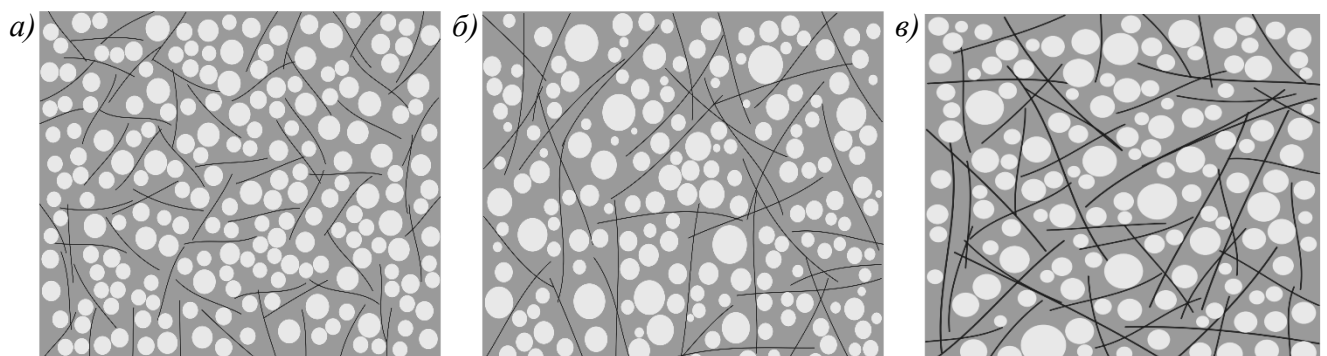


Рисунок 3.9 – Схема дифференцированных механизмов влияния полипропиленовых волокон на структуру теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона: *а* – с волокном 6 мм; *б* – с волокном 12 мм; *в* – комбинированное армирование при соотношении 30:70 (6 мм : 12 мм)

При введении волокон пенобетонная смесь меняет реологические свойства и становится устойчивее. Волокна длиной 6 мм эффективнее повышают вязкость системы и формируют структурированную среду, тогда как волокна длиной 12 мм образуют пространственную сетку, сдерживающую конвективное перемещение пузырьков под воздействием силы тяжести и внутренних течений смеси. Совместное действие этих механизмов обеспечивает максимальную стабильность пенобетонной системы на стадии формирования структуры (рисунок 3.8, *в*).

Таким образом, установлено, что полипропиленовые волокна длиной 6 мм и 12 мм реализуют различные, взаимодополняющие механизмы влияния на пористую структуру пенобетона. Волокна длиной 6 мм с высокой плотностью распределения эффективно стабилизируют локальные участки структуры, встраиваясь в пленочные оболочки и межпоровые перегородки. Волокна длиной 12 мм с меньшей плотностью, но меньшим расстоянием между ними (1,5 мм) формируют пространственный каркас, ограничивающий подвижность пузырьков в

объеме смеси. Комбинированное применение волокон при соотношении 30:70 и обеспечивает синергетический эффект, снижая средний диаметр пор и долю укрупненных пор по сравнению с контрольным образцом без армирования.

Содержание полипропиленового волокна при комбинированном армировании является критическим параметром, определяющим эффективность стабилизации пористой структуры. Для определения содержания фибры при установленном соотношении 30:70 (6 мм : 12 мм) были проведены исследования составов с общим расходом волокна в диапазоне от 0,3 до 1,2 кг/м³.

Оценка однородности пористой структуры осуществлялась путем изучения распределения пор по размерам в различных зонах образца. Для каждого состава изготавливались блоки размером 600×300×200 мм, из которых отбирались образцы из центральной зоны и периферийных зон (на расстоянии 50 мм от внешних поверхностей) для анализа пористой структуры на стадии завершения процессов коалесценции.

Количественный анализ пористой структуры включал определение объемной доли пор различных размеров: мелких (до 0,2 мм), средних (0,2–1,0 мм) и крупных (более 1,0 мм). Результаты исследования представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Влияние содержания комбинированного армирования (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*					
	Поры <0,2 мм, %		Поры 0,2-1 мм, %		Поры >1 мм, %		Поры <0,2 мм, %		Поры 0,2-1 мм, %		Поры >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)

Экспериментальные данные, приведенные в таблице 3.10, показывают, что увеличение содержания комбинированной фибры с 0 до 0,9 кг/м³ последовательно улучшает однородность пористой структуры. В контрольном составе без фибры наблюдается существенная разница в распределении пор между центральной и периферийной зонами: доля крупных пор в периферийной зоне составляет 17,4 %, что на 55 % выше, чем в центральной зоне. Это явление связано с различной интенсивностью процессов коалесценции в объеме и на поверхности пенобетонного массива. При содержании комбинированной фибры 0,6 кг/м³ (соотношение 30:70, что соответствует 0,18 кг/м³ волокон 6 мм и 0,42 кг/м³ волокон 12 мм) доля крупных пор между центральной и периферийной зонами сокращается до 55 %.

При содержании комбинированной фибры 0,9 кг/м³ (0,27 кг/м³ волокон 6 мм и 0,63 кг/м³ волокон 12 мм) достигается максимальная доля мелких пор 43,5 % в центральной зоне и 43,0 % в периферийной зоне, минимальная доля крупных пор 1,5 % и 4,0 % соответственно.

Дальнейшее увеличение содержания фибры до 1,2 кг/м³ существенного улучшения характеристик пористой структуры не дает. Доля мелких пор немного уменьшается и составляет 39,0 % в центральной зоне и 41,8 % в периферийной зоне, тогда как доля крупных пор возрастает до 3,2 и 5,7 % соответственно. Такая динамика связана с затруднением равномерного распределения волокон при повышенной дозировке. В материале формируются локальные скопления фибры, которые нарушают однородность пористой структуры.

Синергетический эффект комбинированного армирования определен с использованием коэффициента синергии K_s . Его рассчитывают как отношение фактического улучшения параметра (снижение доли укрупненных пор) к ожидаемому улучшению, полученному при аддитивном сложении эффектов моноармирования:

$$K_s = \frac{\Delta P_{(6+12 \text{ мм})}}{\Delta P_{6\text{мм}} \cdot 0,3 + \Delta P_{12\text{мм}} \cdot 0,7}, \quad (3.15)$$

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 ($P_{\text{контр}}$); $\Delta P_{6\text{мм}}$ – то же, при армировании фиброй длиной 6 мм; $\Delta P_{12\text{мм}}$ – то же, при армировании фиброй длиной 12 мм

Относительное снижение доли укрупненных пор определяется по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{P_{\text{контр}} - P_i}{P_{\text{контр}}}. \quad (3.16)$$

Для контрольного состава:

$$P_{\text{контр}} = 5,0 + 3,1 + 3,1 = 11,2 \text{ \%}.$$

Для моноармирования волокнами длиной 6 мм:

$$P_{6\text{мм}} = 4,0 + 2,0 + 2,0 = 8,0 \text{ \%};$$

$$\Delta P_{6\text{мм}} = \frac{11,2 - 8,0}{11,2} = \frac{3,2}{11,2} = 0,2857.$$

Следовательно, применение волокон длиной 6 мм обеспечивает снижение доли укрупненных пор на 28,57 %.

Для моноармирования волокнами длиной 12 мм:

$$P_{12\text{мм}} = 3,5 + 1,5 + 0,8 = 5,8 \text{ \%};$$

$$\Delta P_{12\text{мм}} = \frac{11,2 - 5,8}{11,2} = \frac{5,4}{11,2} = 0,4821.$$

Таким образом, применение волокон длиной 12 мм снижает долю укрупненных пор на 48,21 %.

Для комбинированного состава с соотношением волокон 6 мм и 12 мм, равным 30:70:

$$P_{(6+12\text{ мм})} = 2,8 + 1,0 + 0,8 = 4,6 \text{ \%}.$$

Фактическое относительное снижение доли укрупненных пор составляет:

$$\Delta P_{(6+12\text{ мм})} = \frac{11,2 - 4,6}{11,2} = \frac{6,6}{11,2} = 0,5893.$$

Следовательно, комбинированное армирование снижает долю укрупненных пор относительно контроля на 58,93 %.

Ожидаемый аддитивный эффект определяется с учетом массовых долей коротких и длинных волокон:

$$\Delta P_{\text{аддит.}}^{30:70} = \Delta P_{6\text{мм}} \cdot 0,3 + \Delta P_{12\text{мм}} \cdot 0,7.$$

После подстановки получаем:

$$\Delta P_{\text{аддит.}}^{30:70} = 0,2857 \cdot 0,3 + 0,4821 \cdot 0,7 = 0,4232.$$

Аддитивно ожидаемое снижение доли укрупненных пор составляет 42,32 %.

Коэффициент синергии равен:

$$K_s^{30:70} = \frac{\Delta P_{30:70}}{\Delta P_{\text{аддит.}}} = \frac{0,5893}{0,4232} = 1,39.$$

Следовательно, фактический эффект комбинированного армирования при соотношении 30:70 приблизительно на 39 % выше эффекта, ожидаемого при линейном сложении эффектов моноармирования.

Коэффициенты синергии для остальных соотношений гарметрических параметров полипропиленовых фибр: для состава 90:10 $K_s^{90:10} = \frac{0,3304}{0,3053} = 1,08$; для состава 80:20 $K_s^{80:20} = \frac{0,3839}{0,3250} = 1,18$; для состава 70:30 $K_s^{70:30} = \frac{0,4107}{0,3446} = 1,19$; для состава 60:40 $K_s^{60:40} = \frac{0,4375}{0,3643} = 1,20$; для состава 50:50 $K_s^{50:50} = \frac{0,4911}{0,3839} = 1,28$; для состава 40:60 $K_s^{40:60} = \frac{0,5357}{0,4035} = 1,33$; для состава 20:80 $K_s^{20:80} = \frac{0,5536}{0,4428} = 1,25$; для состава 10:90 $K_s^{10:90} = \frac{0,5179}{0,4625} = 1,12$.

Значение $K_s > 1$ подтверждает наличие положительного синергетического эффекта, превышающего простое суммирование эффектов отдельных компонентов до 39 %.

Механизм синергетического взаимодействия волокон различной длины заключается в следующем. Длинные волокна 12 мм формируют первичный пространственный каркас с расстоянием между элементами 1,2–1,8 мм, ограничивающий крупномасштабные перемещения пузырьков. Внутри ячеек этого каркаса короткие волокна 6 мм с высокой плотностью распределения встраиваются в пленочные оболочки и межпоровые перегородки, создавая локальные микробарьеры для коалесценции. Двухуровневая система стабилизации (макроуровень – длинные волокна, микроуровень – короткие волокна) обеспечивает более эффективное подавление процессов укрупнения пор по сравнению с одноуровневой системой при моноармировании.

Дополнительный вклад в синергетический эффект вносит различие в механизмах взаимодействия волокон с пенной системой. Короткие волокна, встроенные в пленочные оболочки, увеличивают их эффективную толщину и

прочность, что затрудняет разрыв тонких участков пленки – основной механизм коалесценции. Длинные волокна, пронизывающие множественные межпоровые перегородки, препятствуют сближению пузырьков – необходимому условию для начала процесса коалесценции. Комбинация обоих защитных механизмов обеспечивает максимальную стабильность пористой структуры.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить дифференцированные механизмы влияния полипропиленовых волокон различной длины на структуру пенобетона и определить параметры дисперсного армирования. Волокна длиной 6 мм обеспечивают эффективную стабилизацию пенной системы и предотвращение коалесценции пузырьков за счет высокой плотности распределения и встраивания в пленочные оболочки и межпоровые перегородки. Волокна длиной 12 мм формируют пространственный армирующий каркас с улучшенной плотностью распределения (среднее расстояние между волокнами 1,2–1,8 мм, что меньше среднего диаметра пор), обеспечивающий перераспределение напряжений и повышение конструктивной прочности теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

3.5. Выводы

1. Исследованы принципы управления процессами формирования пористой структуры теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения с учетом введения в его состав дисперсного армирования полипропиленовой фиброй и его влияния на коалесценцию пены. 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 ($l/d = 120–600$) эффективная вязкость смеси возрастает до 19 %.

2. Установлено, что совместное применение белкового пенообразователя «Foam X» с сульфатом алюминия способствует формированию наиболее стабильной пены с минимальным водоотделением, что связано с его высокой поверхностной активностью и вязкостью пенного каркаса. Рациональное соотношение этих параметров достигалось при концентрации, которая

обеспечивала равномерную структуру пены и минимальный коэффициент водоотделения.

3. Установлено, что введение полипропиленового волокна в состав пенобетона приводит к перераспределению пор по размерам в пенобетонной матрице: возрастает доля мелких пор и снижается доля крупных, что свидетельствует об армирующем воздействии волокна на межпоровые перегородки и снижении коалесценции пузырьков в процессе структурообразования.

4. Анализ влияния длины и объемного содержания волокна на параметры пористой структуры пенобетона показал, что оптимальный эффект дисперсного армирования достигается при использовании волокон длиной от 6 до 12 мм при установленном соотношении 30:70 в сочетании с объемным содержанием, соответствующим условию пересечения потенциальных плоскостей разрушения. Превышение критического объемного содержания сопровождается ростом средней плотности и ухудшением однородности пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона вследствие агломерации волокон и нарушения стабильности пенной массы в процессе укладки.

4. СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

4.1. Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на эксплуатационные свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона с применением метода математического планирования эксперимента

В рамках исследования проведена комплексная оценка эксплуатационных свойств теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов. Основной целью работы явилось установление количественных закономерностей влияния трех рецептурно-технологических факторов – В/Т, удельная поверхность цемента и процентного содержания фибры – на показатели средней плотности и прочности на сжатие. Для систематизации изучения взаимовлияния указанных факторов и получения математически обоснованных выводов был реализован план двух параллельных трехфакторных экспериментов [239].

Эксперимент проводили по трехфакторному центральному композиционному плану второго порядка, включавшему восемь точек полного факторного эксперимента, шесть осевых точек и три параллельных опыта в центре плана. Статистически обработанные экспериментальные данные позволили установить количественную связь между варьируемыми факторами и выходными параметрами. Для аппроксимации использовали полиномиальную модель второго порядка со свободным членом, линейными и квадратичными эффектами факторов, а также эффектами их парного взаимодействия.

Рецептурно-технологические параметры производства образцов и их характеристики получены с использованием метода математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов были приняты: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,4 до 0,6 с интервалом варьирования 0,1; удельная поверхность цемента, $\text{м}^2/\text{кг}$ (X_2) в пределах от 300 до 500 с интервалом варьирования 100; расход фибры I длиной 6 и 12 мм в соотношении 30:70, кг, (X_3) в пределах от 0,6 до 1,2 с интервалом варьирования 0,3 (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
В/Т	X_1	0,4	0,5	0,6	0,1
Удельная поверхность цемента, $\text{м}^2/\text{кг}$	X_2	300	400	500	100
расход фибры I длиной 6 и 12 мм (30:70), кг	X_3	0,6	0,9	1,2	0,3

Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными, в том числе: расход пенообразователя «Foam X» – 4 %; расход сульфата алюминия – 1,0 %; расход суперпластификатора Elocrete – 0,5 % от массы цемента.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Варьируемые факторы						Экспериментальные данные	
	кодированный вид			натуральный вид			Средняя плотность ρ_{cp} , кг/м^3	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	1	0,6	500	1,2	214	0,94
2	1	1	-1	0,6	500	0,6	201	0,94
3	1	-1	1	0,6	300	1,2	294	0,78
4	1	-1	-1	0,6	300	0,6	277	0,86
5	-1	1	1	0,4	500	1,2	205	0,96
6	-1	1	-1	0,4	500	0,6	193	0,82
7	-1	-1	1	0,4	300	1,2	292	1,29
8	-1	-1	-1	0,4	300	0,6	246	0,83
9	1	0	0	0,6	400	0,9	188	0,89
10	-1	0	0	0,4	400	0,9	219	1,00
11	0	1	0	0,5	500	0,9	157	0,63
12	0	-1	0	0,5	300	0,9	230	0,84
13	0	0	1	0,5	400	1,2	255	1,07
14	0	0	-1	0,5	400	0,6	234	0,91
15	0	0	0	0,5	400	0,9	209	0,87
16	0	0	0	0,5	400	0,9	207	0,84
17	0	0	0	0,5	400	0,9	205	0,86

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами (средней плотностью и прочностью на сжатие) и

основными факторами, проводили статическую обработку экспериментальных данных.

Полученные расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии

Параметр	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	202,83	1,40	-37,50	9,30	4,30	-6,20	40,80	-1,25	-2,50	-4,25
$R_{сж}$, МПа	0,84	-0,05	-0,04	-0,01	0,07	-0,03	0,03	0,06	-0,01	0,02

Расчетные значения критерия Стьюдента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Параметр	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	43,62	0,41	-10,91	2,71	0,65	-0,93	6,14	-0,33	-0,65	-1,11
$R_{сж}$, МПа	77,89	-5,77	-4,89	-0,63	4,40	-1,77	2,13	6,88	-0,98	1,82

Расчетные значения, приведенные в таблице 4.4, сопоставляли с табличным показателем, соответствующим принятому уровню значимости и числу степеней свободы. Большему абсолютному значению критерия соответствует более высокая статистическая значимость коэффициента и меньшая вероятность того, что выявленный эффект объясняется случайным разбросом экспериментальных данных.

Получены экспериментально-статические модели влияния управляющих рецептурно-технологических факторов на свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона:

$$\rho_{ср} = 202,83 + 1,40 \cdot X_1 - 37,50 \cdot X_2 + 9,30 X_3 + 4,30 \cdot X_1^2 - 6,20 \cdot X_2^2 + 40,80 \cdot X_3^2 - 1,25 \cdot X_1 \cdot X_2 - 2,50 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,25 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.1)$$

$$R_{сж} = 0,84 - 0,05 \cdot X_1 - 0,04 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_1^2 - 0,03 \cdot X_2^2 + 0,03 \cdot X_3^2 + 0,06 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,02 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.2)$$

Адекватность моделей оценивали по критерию Фишера. Его расчетное значение определяли как отношение дисперсии адекватности модели к дисперсии воспроизводимости эксперимента по формуле:

$$F_p = \frac{S_{(y)}^2}{S_{ag}^2}. \quad (4.3)$$

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

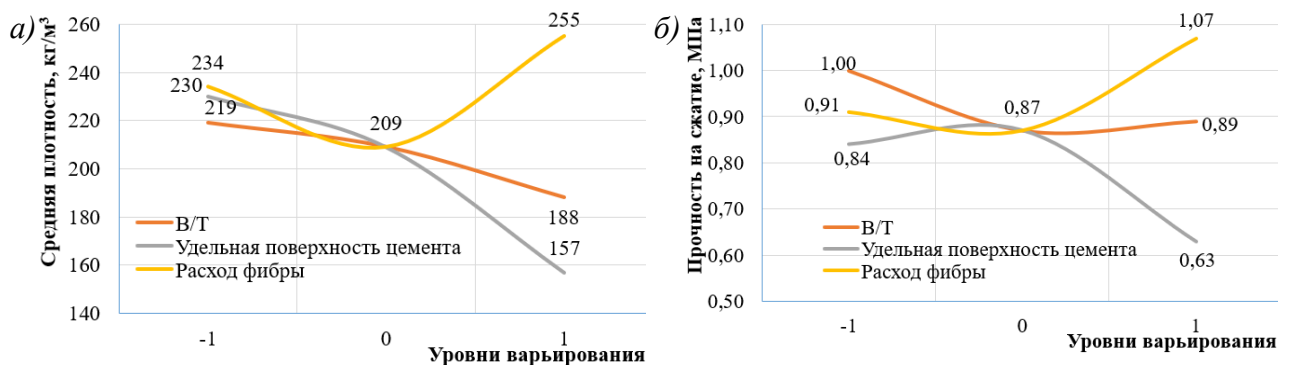


Рисунок 4.1 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона от исследуемых факторов

Анализ данных свидетельствует о том, что максимальная прочность на сжатие достигается при минимальном расходе армирования, что указывает на существенное влияние армирующего компонента на сопротивление материала сжатию. Нелинейное изменение прочности на сжатие в зависимости от уровней факторов может указывать на сложное взаимодействие параметров армирования, требующее дальнейшего изучения.

Комплексное влияние водотвердого отношения, удельной поверхности цемента и расхода фибры I длиной 6 и 12 мм оценивали по поверхностям отклика и их двумерным сечениям, представленным в виде номограмм (рисунки 4.2-4.7). Для каждой номограммы два фактора варьировали в пределах исследованного диапазона, а третий фиксировали на заданном уровне. По графикам находили области факторного пространства, в которых средняя плотность и прочность на сжатие отвечают требуемым значениям, и на их основе выбирали рациональные параметры состава теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

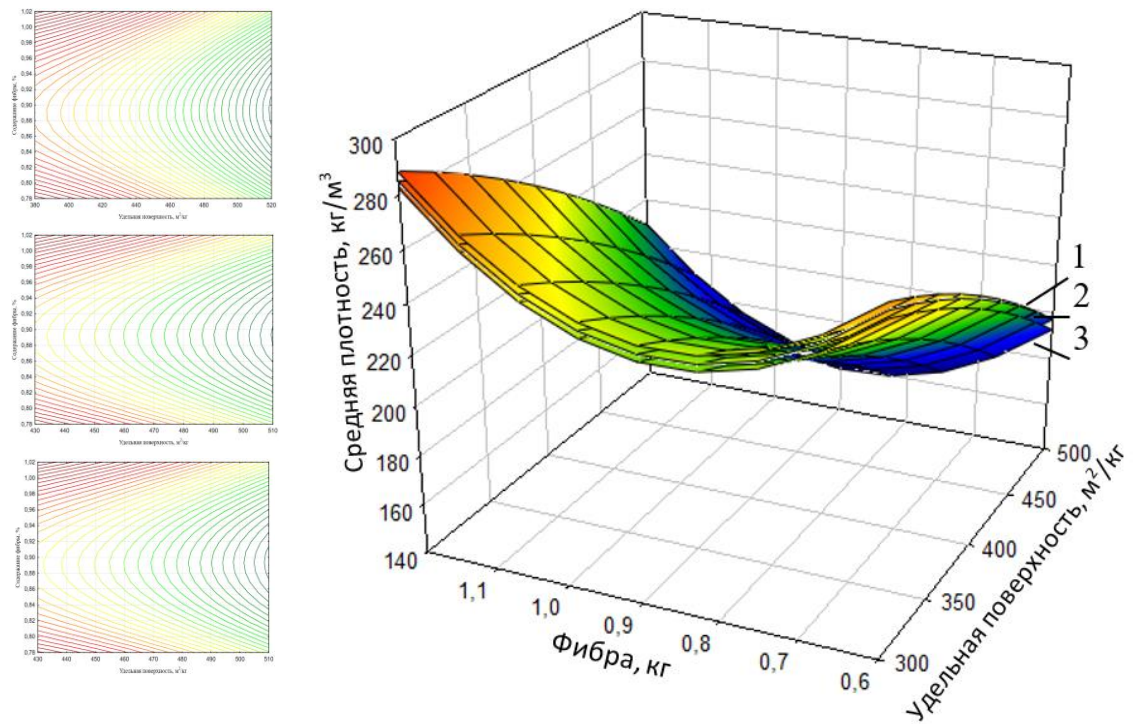


Рисунок 4.2 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:

1 – В/Т = 0,4; 2 – В/Т = 0,5; 3 – В/Т = 0,6

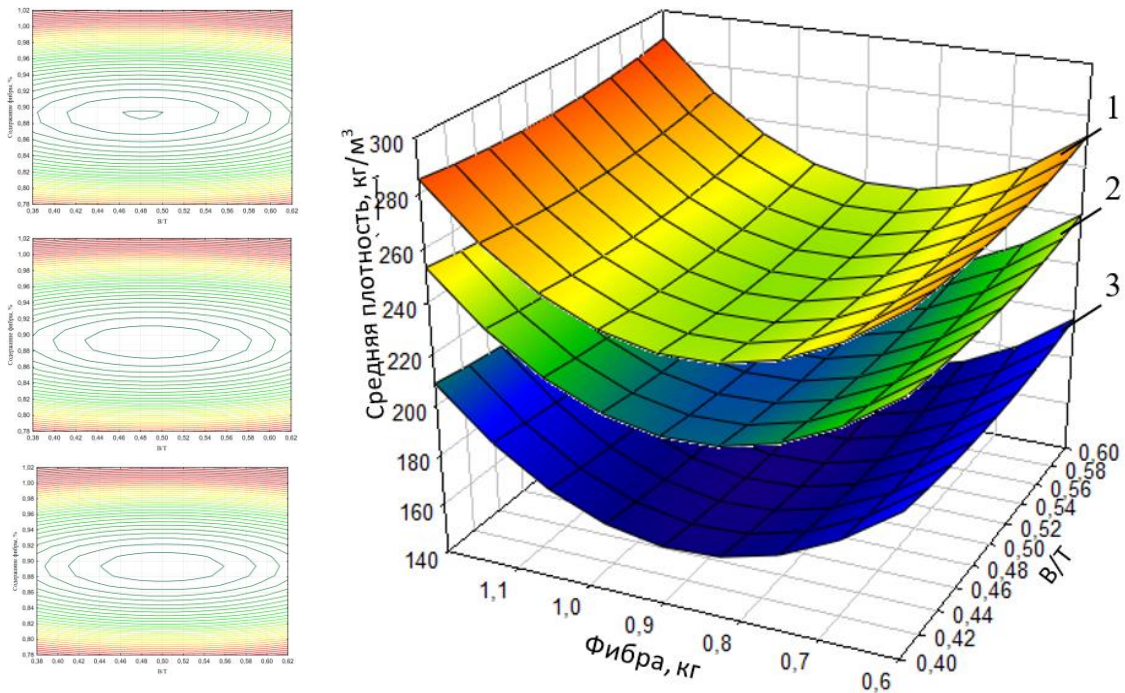


Рисунок 4.3 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй

I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры: 1 – удельная поверхность цемента = 300 м²/кг; 2 – удельная поверхность цемента = 400 м²/кг; 3 – удельная поверхность цемента = 500 м²/кг

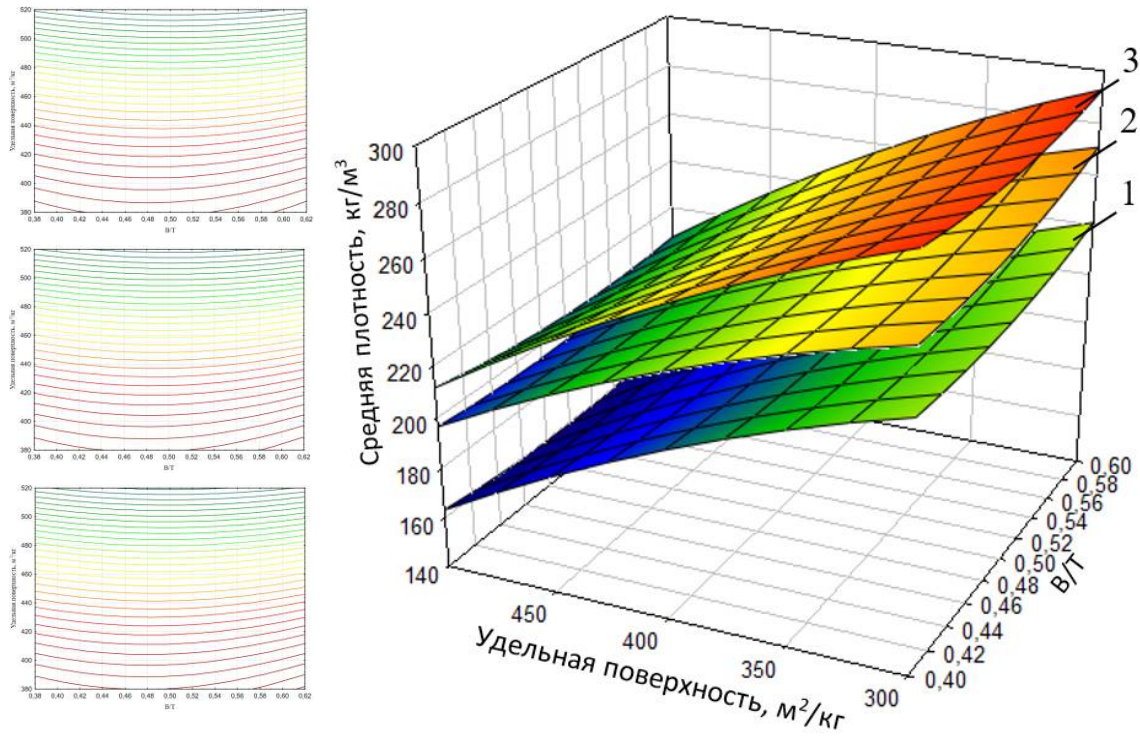


Рисунок 4.4 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры: 1 – содержание фибры = 0,6 кг; 2 – содержание фибры = 0,9 кг; 3 – содержание фибры = 1,2 кг

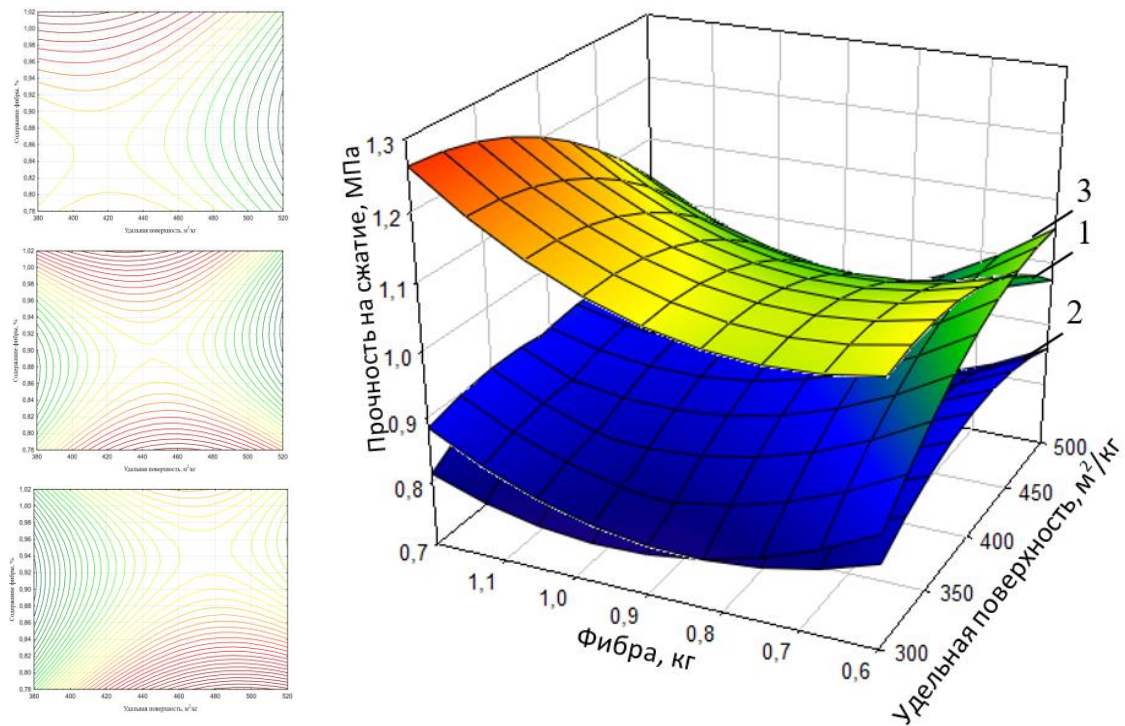


Рисунок 4.5 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
– В/Т = 0,4; 2 – В/Т = 0,5; 3 – В/Т = 0,6

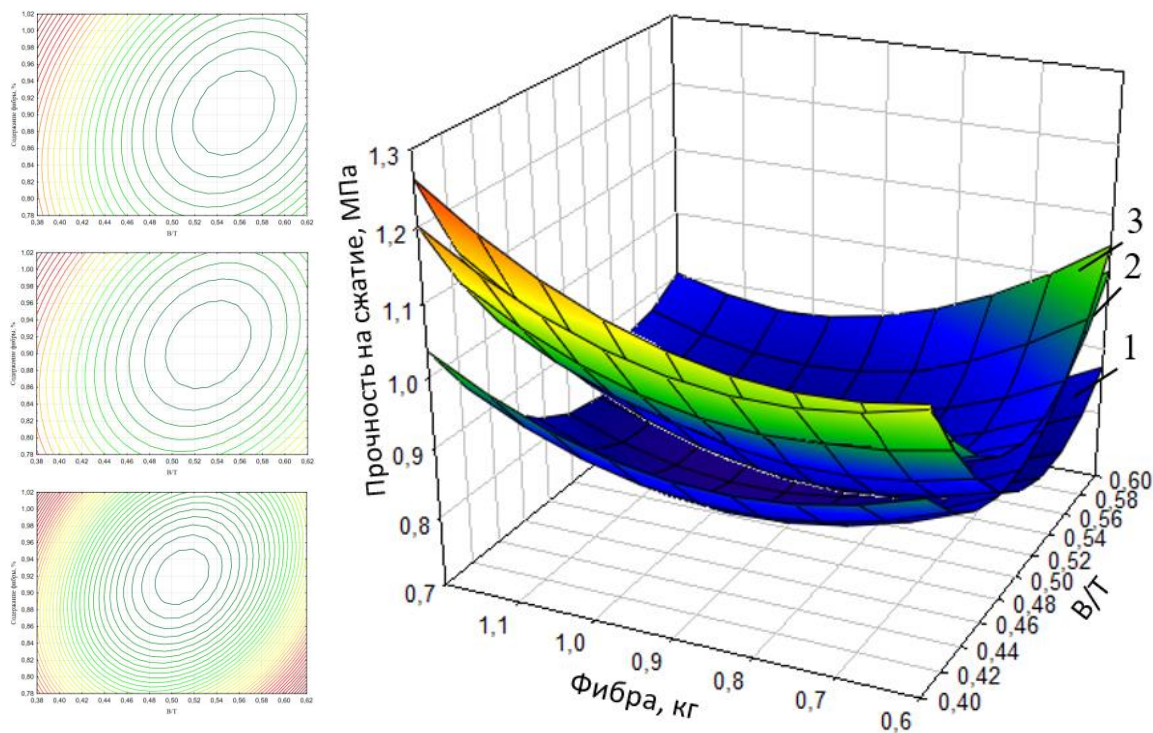


Рисунок 4.6 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 1 – удельная поверхность цемента = 300 м²/кг; 2 – удельная поверхность цемента = 400 м²/кг;
 3 – удельная поверхность цемента = 500 м²/кг

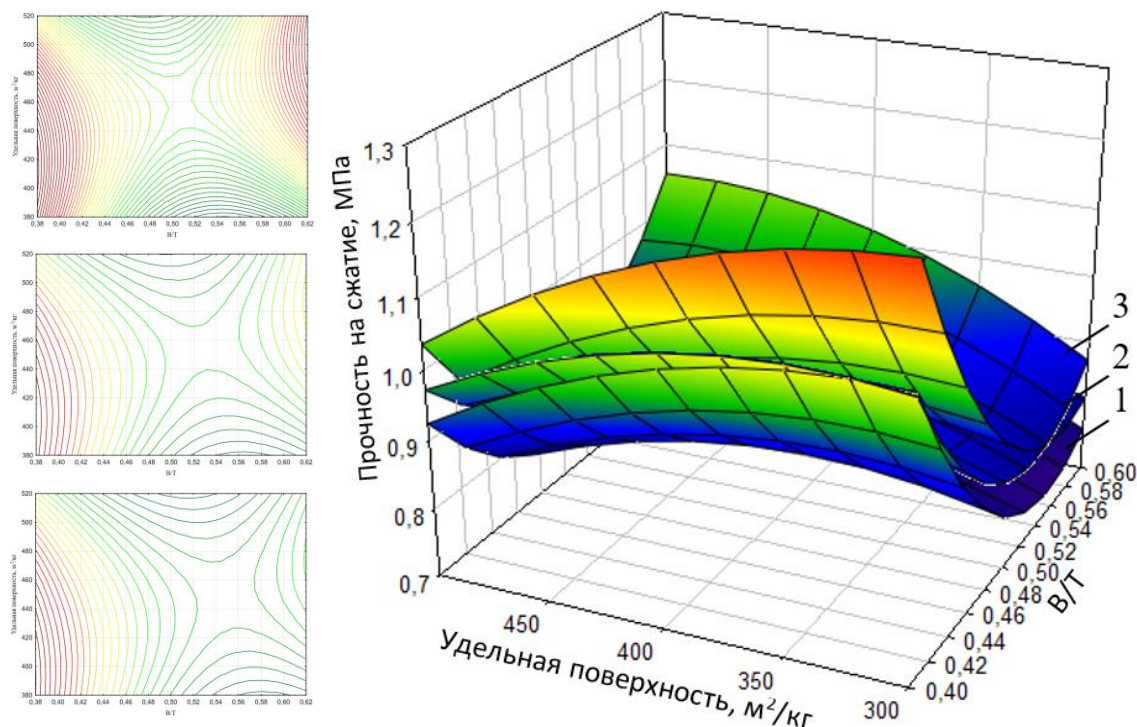


Рисунок 4.7 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I длиной 6 и 12 мм от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 1 – содержание фибры = 0,6 кг; 2 – содержание фибры = 0,9 кг; 3 – содержание фибры = 1,2 кг

Согласно данным номограмм (рисунок 4.2-4.4), установлено, что увеличение удельной поверхности цемента закономерно снижает среднюю плотность пенобетона по всему полю варьирования остальных параметров, что подтверждает определяющую роль тонкости помола в формировании пористой структуры материала. Более высокая удельная поверхность цемента меняет реологическое состояние растворной составляющей, создавая условия для удержания большего объема пены до закрепления ячеистой структуры. В результате пенобетон приобретает более развитую пористость и, соответственно, меньшую среднюю плотность (рисунок 4.3). Водотвердое отношение оказывает на среднюю плотность более существенное влияние, нежели содержание фибры, тогда как рациональный расход волокна способствует стабилизации пеномассы, не приводя при этом к значимому росту средней плотности материала (рисунки 4.2, 4.4). Рациональное содержание полипропиленовой фибры образует пространственную систему, которая ограничивает локальное перемещение твердой и жидкой фаз, стабилизируя пеномассу без существенного роста плотности затвердевшего материала.

Прочность пенобетона на сжатие изменяется нелинейно в зависимости от каждого из трех исследованных факторов. Для водотвердого отношения характерно наличие выраженного оптимума, отклонение от которого в любую сторону влечет снижение прочности – вследствие либо разуплотнения цементного камня, либо нарушения равномерности укладки смеси и, соответственно, формирования межпоровых перегородок (рисунки 4.5-4.7). Содержание фибры воздействует на прочностные показатели двояко: при малых расходах волокна нарушается однородность порового пространства, что сопровождается локальным падением прочности, в то время как при увеличении расхода фибры проявляется армирующий эффект, сдерживающий развитие трещин (рисунок 4.7). Влияние удельной поверхности цемента носит конкурентный характер – более тонкий помол, с одной стороны, интенсифицирует порообразование и тем самым снижает прочность, а с другой, обеспечивает более полную гидратацию и упрочнение

межпоровых перегородок, вследствие чего итоговый результат определяется соотношением указанных процессов (рисунок 4.6).

Проведены аналогичные исследования с фиброй I длиной 6 мм и фиброй II длиной 12 мм с использованием метода математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов были приняты: водотвердое отношение (X_1) в пределах от 0,4 до 0,6 с интервалом варьирования 0,1; удельная поверхность цемента, $\text{м}^2/\text{кг}$ (X_2) в пределах от 300 до 500 с интервалом варьирования 100; расход фибры I длиной 6 мм и фибры II длиной 12 мм в соотношении 30:70, кг, (X_3) в пределах от 0,6 до 1,2 с интервалом варьирования 0,3 (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1	0	1	
В/Т	X_1	0,4	0,5	0,6	0,1
Удельная поверхность цемента, $\text{м}^2/\text{кг}$	X_2	300	400	500	100
Фибра I длиной 6 и фибра II длиной 12 мм (30:70), кг	X_3	0,6	0,9	1,2	0,3

Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными, в том числе: расход пенообразователя «Foam X» – 4 %; расход сульфата алюминия – 1,0 %; расход суперпластификатора Elocrete – 0,5 % от массы цемента.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.6.

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

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

Таблица 4.6 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Варьируемые факторы						Экспериментальные данные	
	кодированный вид			натуральный вид			Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	1	0,6	500	1,2	217	0,89
2	1	1	-1	0,6	500	0,6	206	0,89
3	1	-1	1	0,6	300	1,2	299	0,82
4	1	-1	-1	0,6	300	0,6	280	0,86
5	-1	1	1	0,4	500	1,2	209	0,90
6	-1	1	-1	0,4	500	0,6	197	0,84
7	-1	-1	1	0,4	300	1,2	297	1,05
8	-1	-1	-1	0,4	300	0,6	249	0,88
9	1	0	0	0,6	400	0,9	192	0,87
10	-1	0	0	0,4	400	0,9	222	0,92
11	0	1	0	0,5	500	0,9	130	0,75
12	0	-1	0	0,5	300	0,9	235	0,85
13	0	0	1	0,5	400	1,2	256	1,12
14	0	0	-1	0,5	400	0,6	238	0,88
15	0	0	0	0,5	400	0,9	211	0,86
16	0	0	0	0,5	400	0,9	212	0,85
17	0	0	0	0,5	400	0,9	211	0,86

Таблица 4.7 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии

Параметр	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	205,59	0,81	-34,82	7,00	4,36	-6,09	39,89	-0,78	0,15	-1,18
$R_{сж}$, МПа	0,92	-0,09	-0,01	0,01	0,15	-0,05	0,08	0,08	-0,06	-0,03

Таблица 4.8 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Параметр	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	42,65	0,23	-10,78	1,99	0,64	-0,90	5,88	-0,20	0,04	-0,30
$R_{сж}$, МПа	41,20	-6,25	-0,74	0,07	5,41	-1,88	2,81	4,61	-3,50	-1,62

Расчетные значения, приведенные в таблице 4.8, сопоставляли с табличным показателем, соответствующим принятому уровню значимости и числу степеней свободы. Большему абсолютному значению критерия соответствует более высокая

статистическая значимость коэффициента и меньшая вероятность того, что выявленный эффект объясняется случайным разбросом экспериментальных данных. При $t_p < t_T$ коэффициенты незначительны. Коэффициенты при квадратичных членах, хотя они и незначительны, не исключаются из уравнения регрессии.

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

$$\rho_{cp} = 205,59 + 0,81 \cdot X_1 - 34,82 \cdot X_2 + 7,00 \cdot X_3 + 4,36 \cdot X_1^2 - 6,09 \cdot X_2^2 + 39,89 \cdot X_3^2 - 0,78 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,15 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,18 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.4)$$

$$R_{сж} = 0,92 - 0,09 \cdot X_1 - 0,01 \cdot X_2 + 0,01 \cdot X_3 + 0,15 \cdot X_1^2 - 0,05 \cdot X_2^2 + 0,08 \cdot X_3^2 + 0,08 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,06 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,03 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.5)$$

По уравнениям регрессии, входящим в математическую модель, дан анализ влияния исследуемых факторов при прочих равных условиях на среднюю плотность и прочность на сжатие пенобетона, представленный на рисунке 4.8.

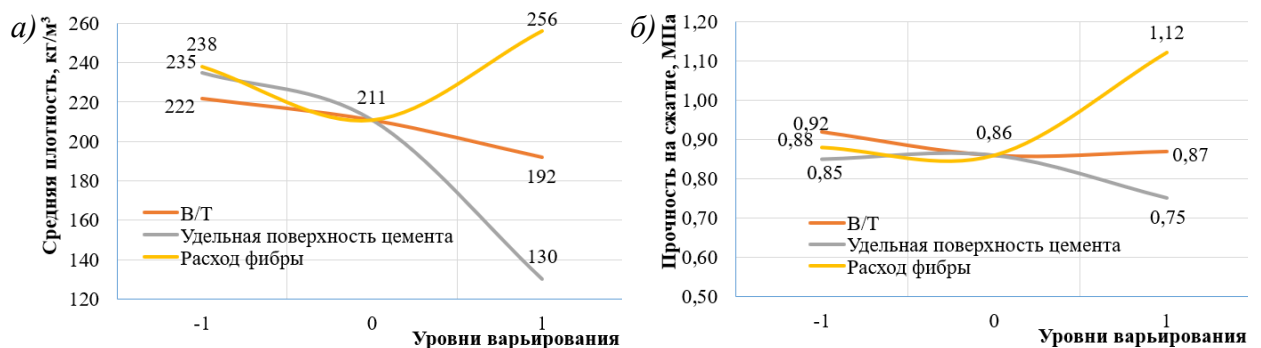


Рисунок 4.8 – Зависимости средней плотности (а) и прочности на сжатие (б) теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона от исследуемых факторов

Комплексное представление о влиянии В/Т, удельной поверхности цемента и процентного содержания фибры на выходные параметры отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей выходных параметров от совокупности исследуемых факторов (рисунки 4.9-4.14).

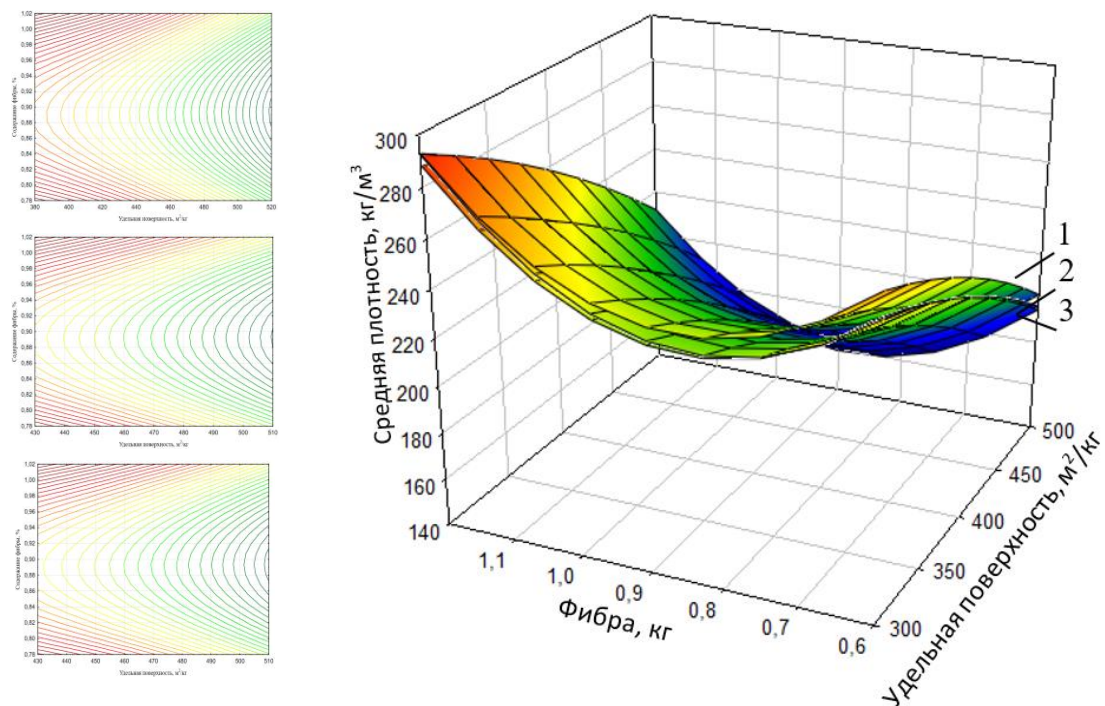


Рисунок 4.9 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 1 – В/Т = 0,4; 2 – В/Т = 0,5; 3 – В/Т = 0,6

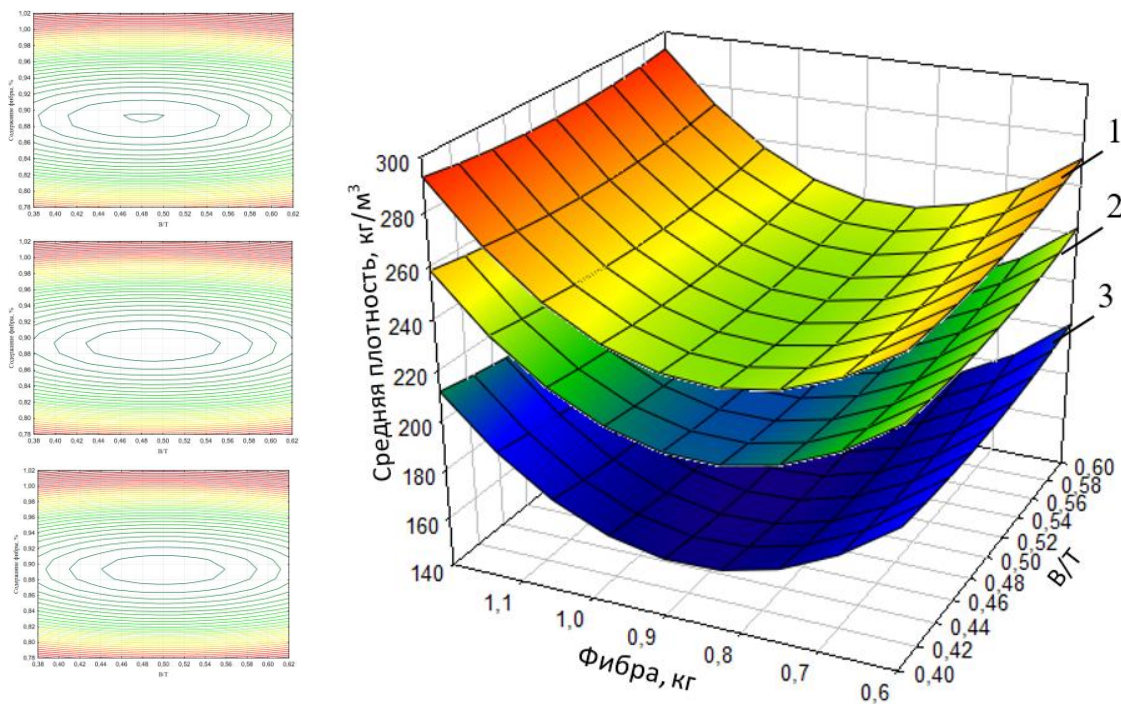


Рисунок 4.10 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 – удельная поверхность цемента = 300 м²/кг; 2 – удельная поверхность цемента = 400 м²/кг;
 3 – удельная поверхность цемента = 500 м²/кг

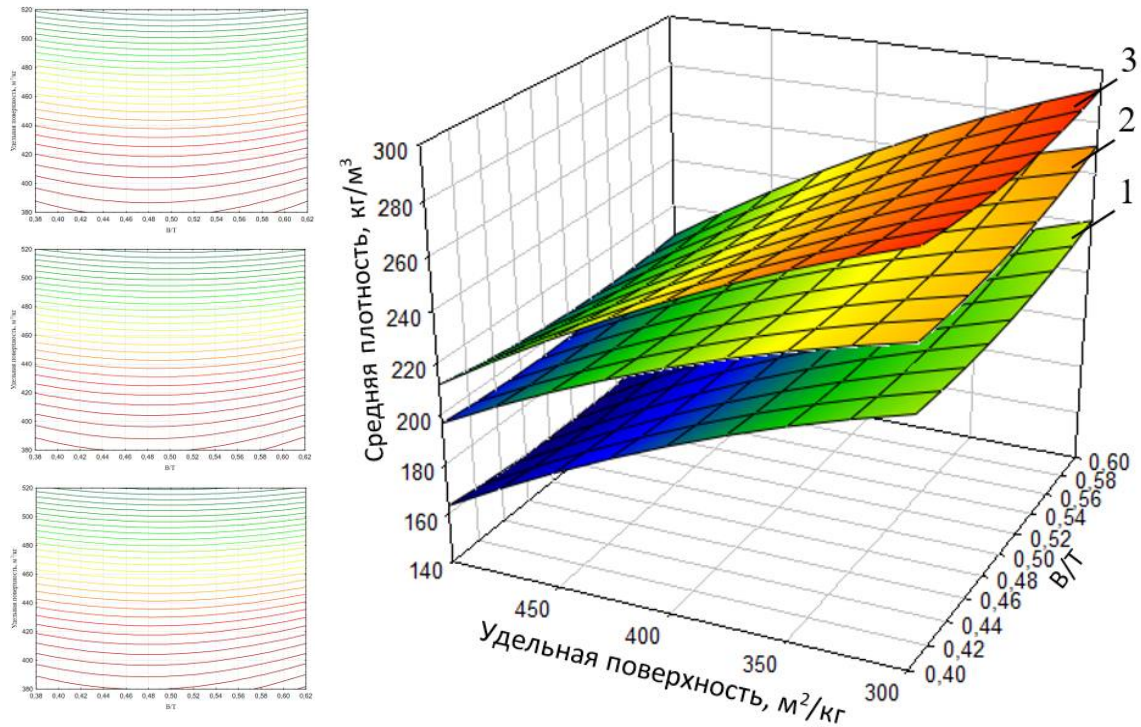


Рисунок 4.11 – Зависимости средней плотности дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 1 – содержание фибры = 0,6 кг; 2 – содержание фибры = 0,9 кг; 3 – содержание фибры = 1,2 кг

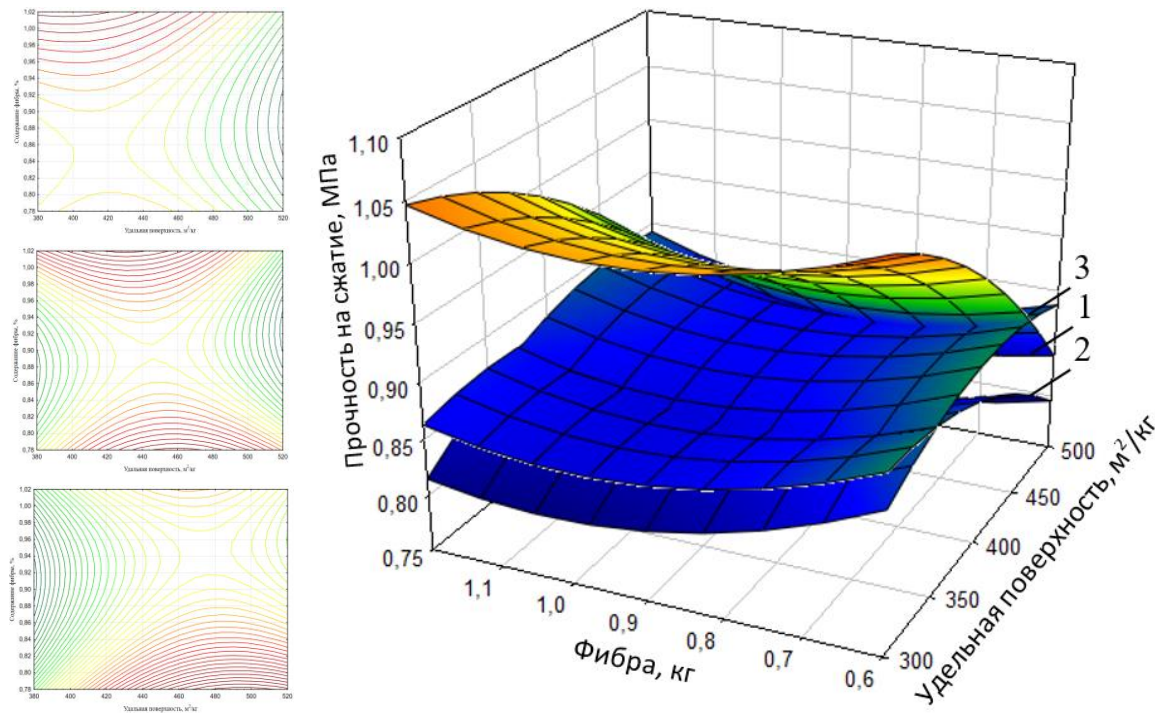


Рисунок 4.12 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры:
 1 – В/Т = 0,4; 2 – В/Т = 0,5; 3 – В/Т = 0,6

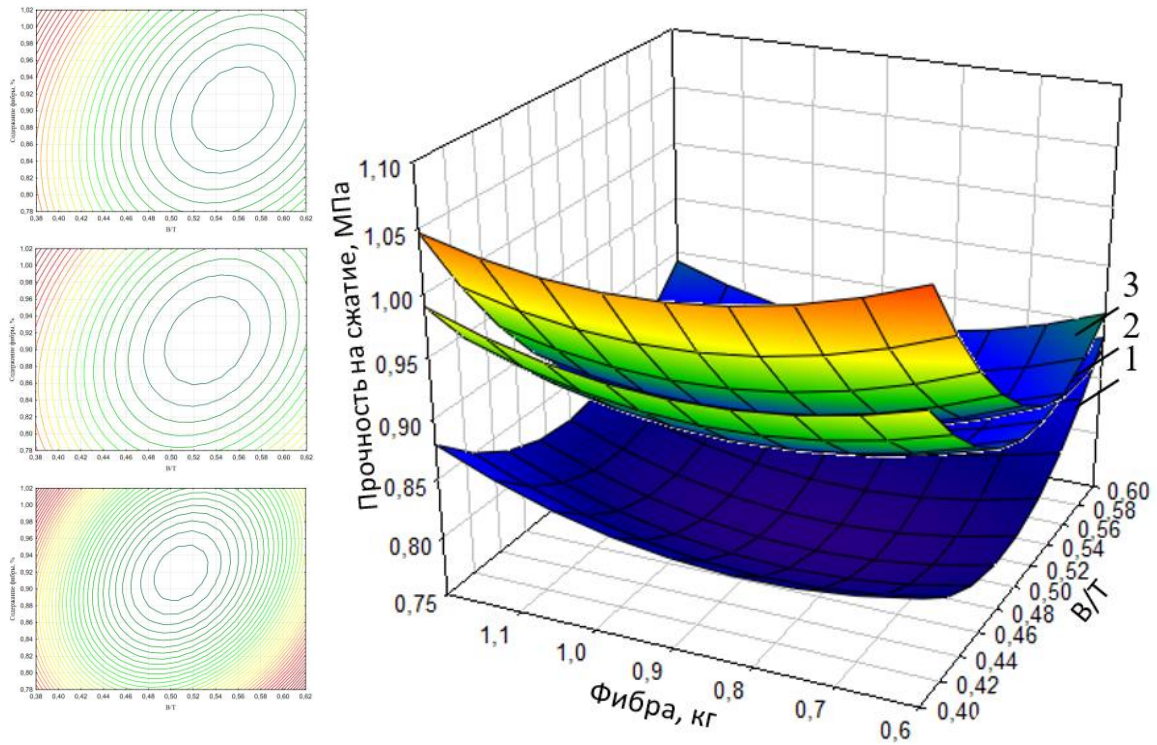


Рисунок 4.13 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры: 1 – удельная поверхность цемента = 300 м²/кг; 2 – удельная поверхность цемента = 400 м²/кг; 3 – удельная поверхность цемента = 500 м²/кг

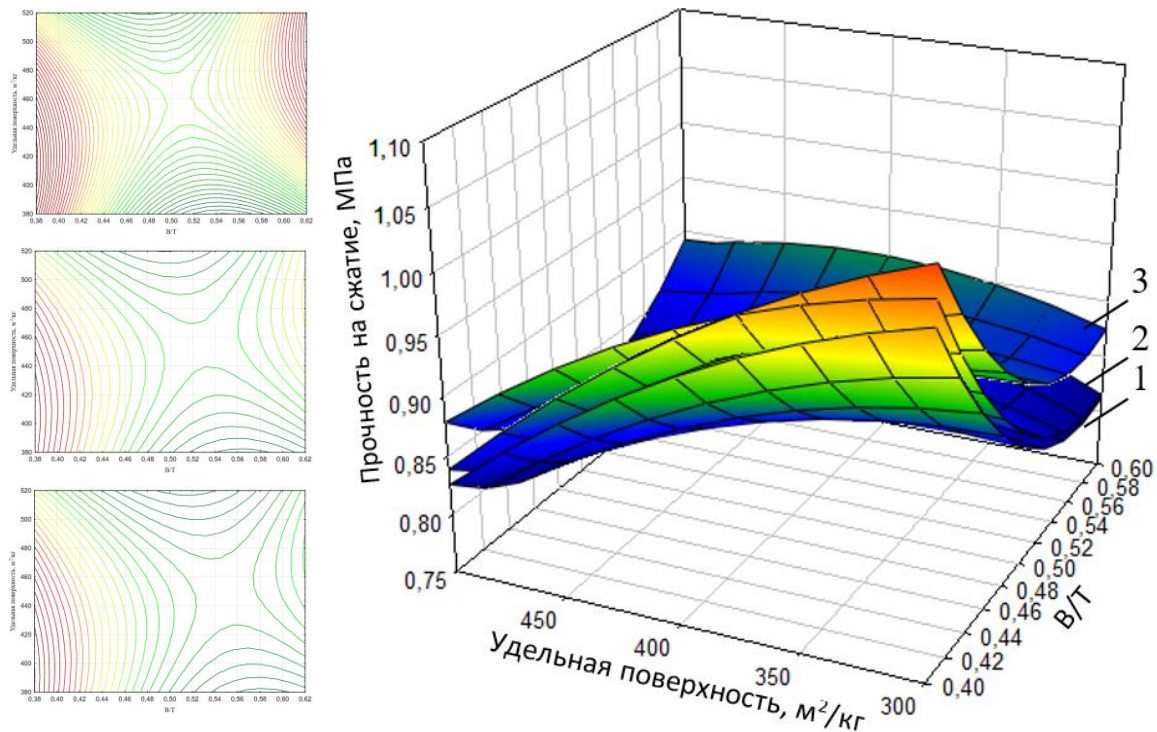


Рисунок 4.14 – Зависимости прочности на сжатие дисперсно-армированного пенобетона с фиброй I (6 мм) и фиброй II (12 мм) от В/Т, удельной поверхности цемента и расхода фибры: 1 – содержание фибры = 0,6 кг; 2 – содержание фибры = 0,9 кг; 3 – содержание фибры = 1,2 кг

Согласно данным номограмм (рисунок 4.9-4.11), установлено, что при росте удельной поверхности цемента средняя плотность пенобетона закономерно уменьшается при любых значениях остальных параметров, что подтверждает определяющее влияние тонкости помола на формирование пористой структуры материала. Изменение водотвердного отношения оказывает большее влияние на среднюю плотность пенобетона, чем содержание фибры, а при рациональном расходе волокна пена сохраняет устойчивую структуру, и средняя плотность материала заметно не увеличивается (рисунок 4.9, 4.11).

Полученные закономерности (рисунок 4.9-4.14) указывают, что тонкость помола цемента относится к критическим технологическим параметрам при производстве сверхлегких пенобетонов низких марок по средней плотности ($D150-D200$). При недостаточной дисперсности вяжущего тонкие межпоровые перегородки медленнее набирают раннюю структурную прочность, из-за чего разрушаются и провоцируют последующую коалесценцию пор. Повышенная удельная поверхность цемента ускоряет упрочнение перегородок и поддерживает устойчивость пористой структуры пенобетона.

4.2. Физико-механические свойства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Исходя из результатов проведенных исследований (см. п. 4.1), рассмотрены составы теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов. Разработанные составы и результаты комплексного анализа физико-механических свойств теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов систематизированы в таблице 4.9.

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 ускорителя твердения в количестве 1 % с образованием высокодисперсного аморфного гидроксида алюминия в цементной системе и стабилизатора протеинового пенообразователя «Foam X», и дисперсного армирования

теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона полипропиленовой фиброй с длиной волокон 6 и 12 мм при их соотношении 30:70.

Таблица 4.9 – Составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона и физико-механические характеристики изделий на их основе

№ п/п	Цемент ЦЕМ I 42,5 Н, кг	Фибра I (6 мм), кг	Фибра I (12 мм), кг	Фибра II (12 мм), кг	Пенообразователь «Foam X», кг	Сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$, кг	Суперпластификатор Elocrete, кг	Удельная поверхность цемента, m^2/kg	Рекоменд. В/Т	Средняя плотность $\rho_{ср}$, kg/m^3	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа	Класс по прочности на сжатие	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	Коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Коэффициент паропроницаемости, $мг/(м \cdot ч \cdot Па)$	Водопоглощение, %	Усадка, мм/м
1	118	0,27	0,63	-	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	157	0,18	0,42	-	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	196	0,18	-	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	226	0,36	0,84	-	9,04	2,26	1,13	300	0,4	292	D300	1,29	B1	0,62	0,065	0,13	15	1,8

Получены рациональные составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности D150–D300, обеспечивающие класс по прочности на сжатие B0,35-B1 при коэффициенте теплопроводности 0,055–0,065 Вт/(м·°C).

Результаты, полученные при разработке составов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения, свидетельствуют о необходимости учета взаимодействия сырьевых компонентов в составе теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

4.3. Исследование микроструктуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Анализ микроструктуры исследуемых образцов теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов, выполненный методом сканирующей

электронной микроскопии (SEM), выявил существенные различия в распределении пор по размерам в зависимости от марок по средней плотности.

Микроструктура исследованных теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов характеризуется выраженной пористой структурой, однако по мере изменения марки по средней плотности наблюдаются существенные отличия в строении порового пространства. Для всех составов характерно наличие системы преимущественно замкнутых пор, разделенных тонкими цементными перегородками, в теле которых присутствуют гидратные новообразования и отдельные участки капиллярной пористости. При этом с уменьшением марок по средней плотности от $D300$ к $D150$ средний диаметр пор закономерно снижается (рисунок 4.15), но одновременно повышается равномерность их распределения, уменьшается доля крупных дефектных включений и локальных коалесцированных полостей. В результате структура становится более однородной и устойчивой по объему, несмотря на более высокую общую пористость.

Для пенобетона марки по средней плотности $D300$ микроструктура отличается наиболее крупными порами и относительно более плотными межпоровыми перегородками (рисунок 4.15, *а*), заполненными низкоосновным С-С-Н-гелем и продуктами гидратации, что обеспечивает высокую плотность упаковки матрицы и снижение количества открытых капиллярных каналов. На микрофотографиях фиксируются округлые и овальные ячейки преимущественно мелкого и среднего размера, при этом встречаются отдельные укрупненные поры, локальные зоны с неодинаковой толщиной стенок и отдельные участки с неравномерным распределением газовой фазы.

В теплоизоляционном дисперсно-армированном пенобетоне марки по средней плотности $D250$ (рисунок 4.15, *б*) наблюдается более развитая и упорядоченная поровая структура. Увеличивается доля мелких пор и улучшается их пространственное распределение. Поры приобретают более правильную форму, снижается доля вытянутых и сливающихся ячеек, а межпоровые перегородки становятся более равномерными по толщине.

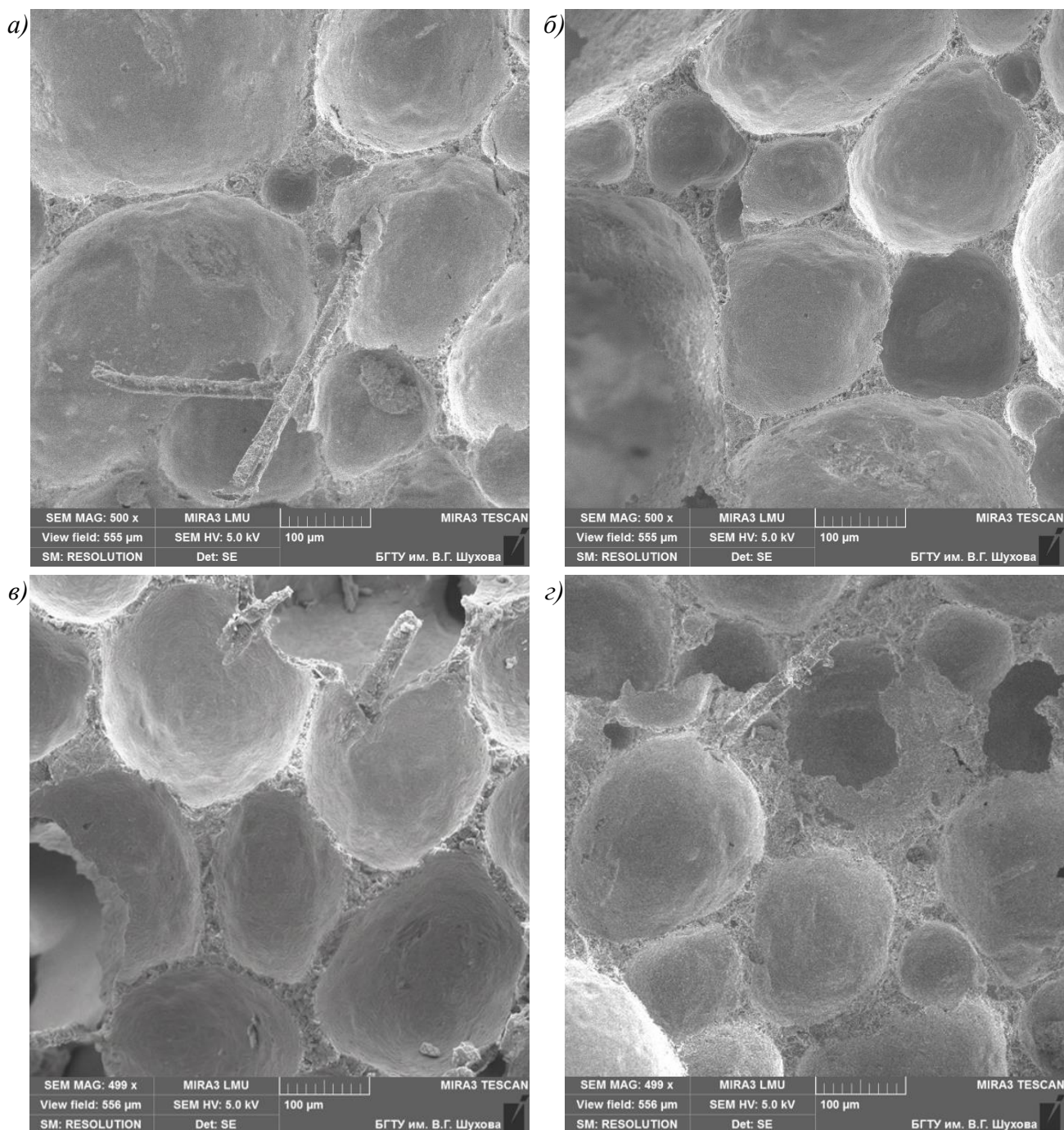


Рисунок 4.15 – Микроструктура образцов дисперсно-армированных пенобетонов: *а* – марки по средней плотности *D300*; *б* – марки по средней плотности *D250*; *в* – марки по средней плотности *D200*; *г* – марки по средней плотности *D150*

Для дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности *D200* характерно увеличение доли мелких пор, которые распределяются по объему материала еще равномернее (рисунок 4.15, *в*). Структура приобретает выраженный полидисперсный характер. Крупные дефекты почти не доминируют, тогда как основная часть пор сосредоточена в узком диапазоне размеров. Дисперсное

армирование стабилизирует такую структуру, поскольку волокна препятствуют коалесценции пузырьков, поддерживают устойчивость межпоровых перегородок и способствуют более равномерному распределению напряжений по объему материала.

Мелкопористой и равномерной структурой характеризуется теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон марки по средней плотности $D150$ (рисунок 4.15, *з*). При снижении средней плотности до этого уровня доля мелких пор максимальна, а упорядоченное распределение ячеек проявляется особенно отчетливо. Поры преимущественно округлые, они расположены достаточно равномерно, крупные дефектные полости встречаются редко. Межпоровые перегородки в образце марки по средней плотности $D150$ тоньше, чем в более плотных составах. Дисперсное армирование вместе с равномерным распределением пор поддерживает упорядоченность структуры, поэтому она сохраняет однородный характер даже при уменьшении толщины перегородок.

Синергетический механизм стабилизации пористой структуры посредством дисперсного армирования пенобетона полипропиленовой фиброй с установленными геометрическими параметрами волокон 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.

4.4. Разработка системы контроля и оценки качества пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

В рамках повышения эффективности производства и применения теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов неавтоклавного твердения особое значение приобретает совершенствование методов контроля

качества макропористой структуры материала, определяющей совокупность его физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Для более точного количественного описания характера пористой структуры в ячеистом бетоне вводится безразмерный параметр фрактальности, где используется фрактальная размерность D в качестве такого параметра, который отражает степень заполнения порами объема ячеистого бетона. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона характеризует степень заполнения исследуемой области порами и отражает сложность их пространственного распределения. При этом большему значению фрактальной размерности соответствует более развитая структура порового пространства, в которой возрастает доля мелких пор и увеличивается извилистость границ межпоровых перегородок. Этот параметр принимает значения в диапазоне от 1 до 2. Значение $D = 1$ указывает на отсутствие пор, а $D = 2$ означает полное заполнение площади рассматриваемой структуры ячеистого бетона порами, формируя одну сплошную пору [191].

При использовании метода подсчета ячеек для исследования фрактальной размерности пористой структуры пористого бетона необходимо определить площадь, занимаемую порами на плоскости. Для этого необходимо разбить плоскость на элементы определенного размера a и определить количество элементов N , проходящих через внутреннюю границу поры. Связь между N и a описывается формулой Мандельброта-Ричардсона.

$$N = C \cdot a^{-D}, \quad (4.6)$$

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

Методы определения фрактальной размерности, основанные на подсчете числа ячеек N , содержащих часть объекта при различных значениях размера ячеек h , предполагают наложение сетки на цифровое изображение. При этом при малых размерах ячеек линии сетки накладываются на контур фрактала, что приводит к снижению точности определения количества занятых ячеек и, как следствие, к погрешности в вычислении фрактальной размерности, а учет наложения линий

сетки на контур изображения поверхности ячеистого бетона приводит к усложнению расчета. Кроме того, в ряде методов требуется ручное задание допусков отклонения тоновых значений пикселей, что повышает трудоемкость анализа и вводит субъективный фактор [240].

В связи с выявленными недостатками был разработан способ определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов, в котором размер ячейки h принимается равным размеру пикселя цифрового изображения, а изменение h осуществляется путем последовательного изменения разрешения изображения [229]. Такой подход позволяет реализовать метод подсчета ячеек на уровне пиксельного анализа без физического наложения сетки, что повышает точность и воспроизводимость результатов.

В качестве объекта исследования использованы образцы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности $D150$ – $D300$ с размерами сторон лицевой поверхности 50–100 мм. Лицевая поверхность образца подвергалась предварительной обработке: осуществлялась шлифовка до получения ровной однородной поверхности с минимальными высотными неровностями, исключаящими влияние шероховатости на результат анализа. Для предотвращения закупоривания пор абразивной пылью поверхность продувалась сжатым воздухом с использованием компрессора. После завершения шлифовки и продувки визуально контролировалось качество поверхности, исключались участки с дефектами и локальными повреждениями.

Получение цифровых изображений лицевой поверхности образцов пенобетона осуществлялось с помощью цифровой фотокамеры высокого разрешения, установленной на штативе таким образом, чтобы оптическая ось объектива была ориентирована перпендикулярно поверхности образца (рисунок 4.16, *а*). Расстояние от объектива до поверхности подбиралось исходя из обеспечения требуемого масштаба изображения и четкости визуализации пористой структуры образца. Для повышения качества изображения использовалось

равномерное освещение, исключаяющее появление теней, бликов шумов и других артефактов изображения, снижающих качество последующей обработки.

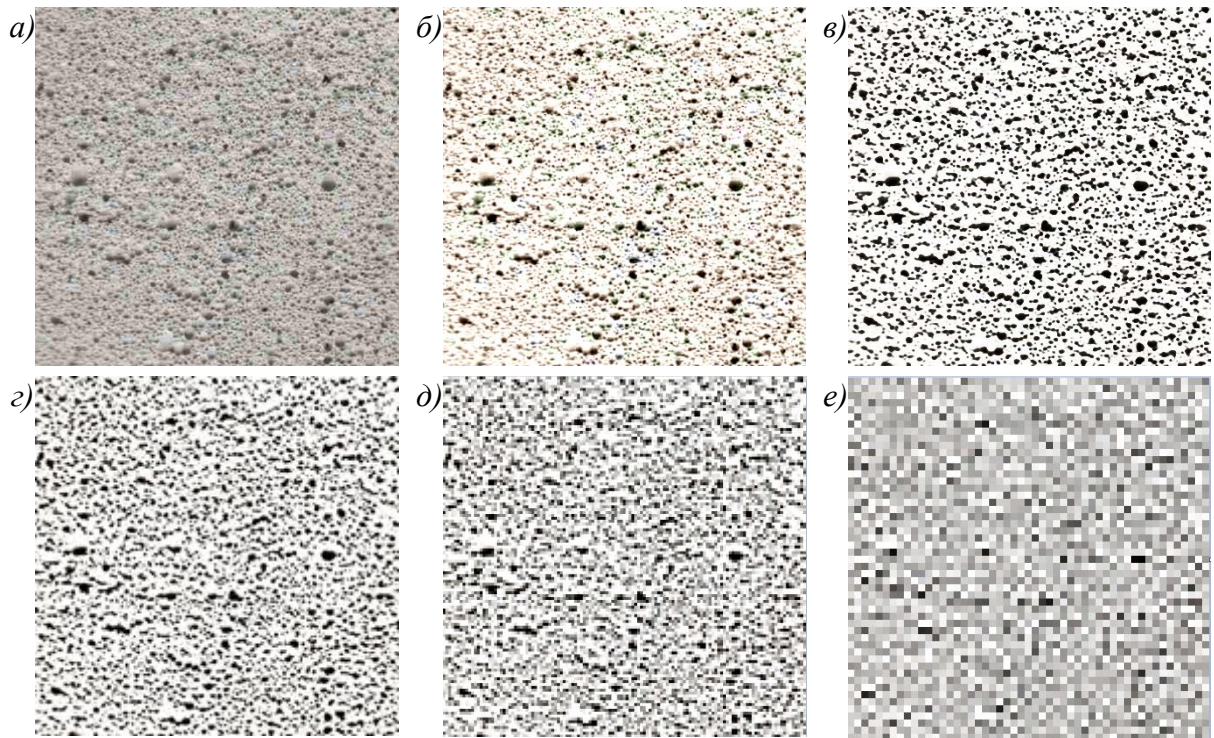


Рисунок 4.16 – Обработка цифрового изображения лицевой поверхности пенобетона:

a – натуральный вид; *б* – преобразованное изображение в полутоновое;
в – бинаризованное изображение; *г-е* – последовательное изменение разрешения изображения

Дальнейшая обработка изображения включала следующую последовательность действий. На начальном этапе цветное изображение импортировалось в специализированную программу для обработки изображений, где выполнялось преобразование в полутоновое с распределением интенсивностей пикселей по уровню серого (рисунок 4.16, *б*). Затем осуществлялась бинаризация изображения с разделением пикселей на принадлежащие поровой и твердой составляющим лицевой поверхности образцов ячеистых бетонов. При этом пиксели, интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, относились к порам, а более светлые пиксели – к межпоровым перегородкам. Порог бинаризации выбирался автоматически на основании анализа гистограммы распределения уровней серого, что позволило минимизировать субъективность выбора границы между порами и матрицей.

Бинаризованное изображение импортировалось в специализированную программу анализа цветораспределений пикселей, позволяющую задавать различное разрешение изображения и определять количество пикселей с заданным диапазоном значений (рисунок 4.16, в). В реализованном способе размер ячейки h принимался равным размеру пикселя при соответствующем разрешении. Последовательно задавались несколько уровней разрешения, соответствующих различным значениям h (рисунок 4.16, з-е). Для каждого значения разрешения определялось количество пикселей N , интенсивность которых наиболее близка к черному цвету, то есть соответствующих поровому пространству. Таким образом, формировался набор пар значений (h, N) , по которому затем осуществлялось построение зависимости $\ln N$ от $\ln h$.

Теоретически связь между числом занятых ячеек N и размером ячейки h для фрактальной структуры описывается выражением:

$$D_p = \ln N / \ln h, \quad (4.7)$$

где D_p – фрактальная размерность.

Определение зависимости количества занятых ячеек N со стороной ячейки h от размера ячейки осуществлялось в двойных логарифмических координатах при построении графика линии логарифмической зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ и определению фрактальной размерности D_p по тангенсу угла наклона аппроксимационной линии, полученной построением логарифмической зависимости. Для оценки качества аппроксимации и достоверности полученного значения фрактальной размерности рассчитывался коэффициент детерминации R^2 .

Для оценки эффективности реализованного способа было проведено сравнительное исследование с использованием метода, основанного на наложении сетки с квадратными ячейками на цифровое изображение и последовательном изменении размера ячейки h при ручном подсчете числа ячеек, содержащих контур фрактала. Результаты расчета параметров для построения линии логарифмической зависимости представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты расчета параметров для построения линий логарифмических зависимостей

Показатель	Размер ячейки h				
	1,0	0,6	0,5	0,3	0,25
$\ln h$	0,000	–0,511	–0,693	–1,204	–1,386
Метод подсчета ячеек					
Марка по средней плотности $D150$					
Количество ячеек N	72	121	106	1242	1268
$\ln N$	4,28	4,80	4,66	7,12	7,15
Коэффициент детерминации R^2	0,910				
Марка по средней плотности $D200$					
Количество ячеек N	87	488	345	393	1055
$\ln N$	4,47	6,19	5,84	5,97	6,96
Коэффициент детерминации R^2	0,905				
Марка по средней плотности $D250$					
Количество ячеек N	32	241	187	639	614
$\ln N$	3,47	5,48	5,23	6,46	6,42
Коэффициент детерминации R^2	0,915				
Марка по средней плотности $D300$					
Количество ячеек N	84	196	190	465	690
$\ln N$	4,43	5,28	5,25	6,14	6,54
Коэффициент детерминации R^2	0,920				
Изменение разрешение изображения					
Марка по средней плотности $D150$					
Количество ячеек N	64	212	284	678	952
$\ln N$	4,16	5,36	5,65	6,52	6,86
Коэффициент детерминации R^2	0,985				
Марка по средней плотности $D200$					
Количество ячеек N	67	179	259	734	907
$\ln N$	4,20	5,19	5,56	6,60	6,81
Коэффициент детерминации R^2	0,987				
Марка по средней плотности $D250$					
Количество ячеек N	68	197	273	572	772
$\ln N$	4,22	5,28	5,61	6,35	6,65
Коэффициент детерминации R^2	0,988				
Марка по средней плотности $D300$					
Количество ячеек N	71	176	238	586	837
$\ln N$	4,26	5,17	5,47	6,37	6,73
Коэффициент детерминации R^2	0,990				

Логарифмические зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ приведен на рисунке 4.17. Методом наименьших квадратов построены прямолинейные зависимости $\ln N = k \cdot \ln h$ и определен тангенс угла наклона полученной прямой.

Значение тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой соответствует значению фрактальной размерности D_p .

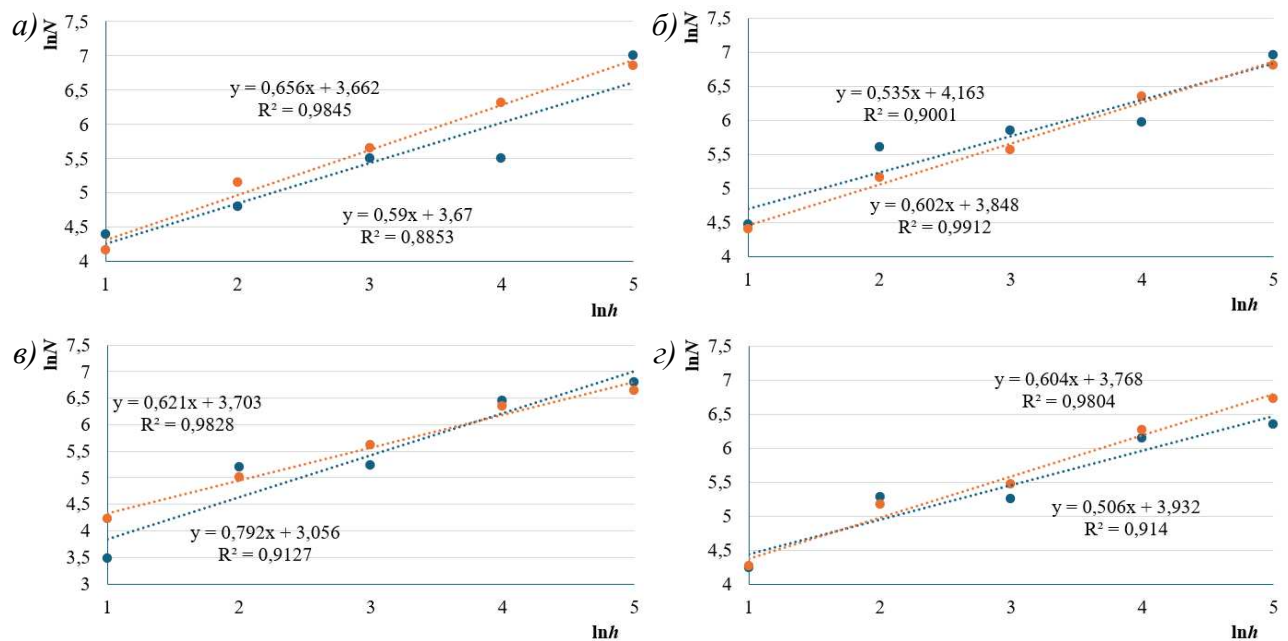


Рисунок 4.17 – Логарифмические зависимости по $\ln N$ от $\ln h$ для образцов теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности: а – D150; б – D200; в – D250; г – D300; — метод подсчета ячеек; — разработанный способ

Анализ результатов показал, что разработанный способ обеспечивает более высокие значения коэффициента регрессии, меньший разброс измерений и более устойчивое значение фрактальной размерности по сравнению с методом определения фрактальной размерности подсчетом ячеек. Установлено, что оба способа обеспечивают хорошую линейность зависимости $\ln N$ от $\ln h$ в двойных логарифмических координатах, однако способ, основанный на изменении разрешения изображения поверхности пенобетона, отличается большей крутизной линий регрессии для теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов марок по средней плотности D150–D300. То есть при последовательном изменении разрешения изображения, когда размер ячейки h приравнивается размеру пикселя, происходит более чувствительное отражение сложности пористой структуры материала. Повышенное значение углового коэффициента в разработанном способе связано с тем, что исключение наложения линий сетки на контуры пор позволяет более точно фиксировать мелкие поры и их распределение по

масштабам, что приводит к увеличению значения фрактальной размерности и лучшему разделению характеристик пористой структуры между образцами разных марок по средней плотности.

Применение разработанного способа позволило получить количественные оценки фрактальной размерности поровой структуры теплоизоляционных дисперсно-армированных пенобетонов различных марок по средней плотности с использованием разработанной программы для ЭВМ (Приложение Д). Установлено, что для составов $D250$ – $D300$ характерны относительно низкие значения фрактальной размерности $D_p = 1,74$ – $1,82$ (рисунок 4.18), в то время как для менее плотных 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.

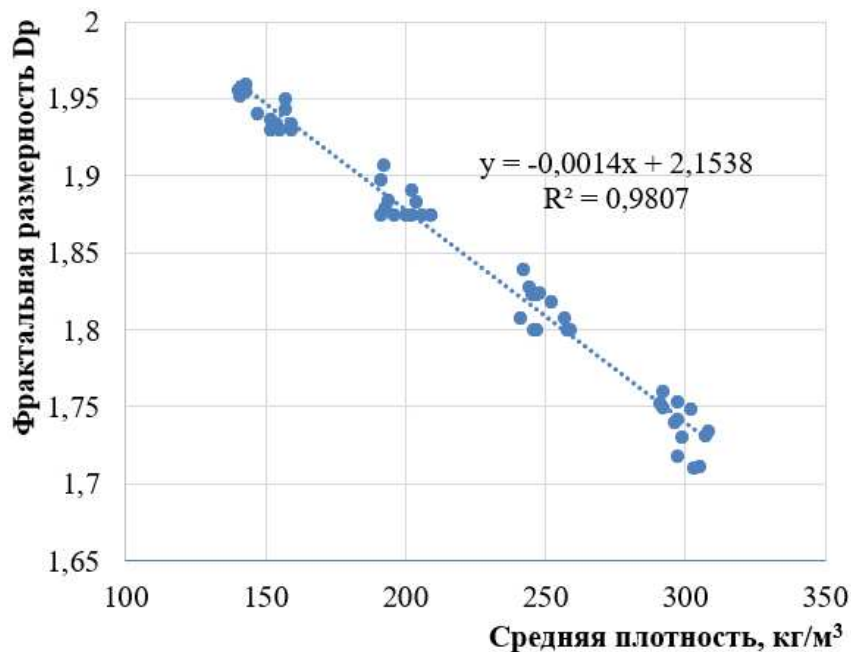


Рисунок 4.18 – Зависимость средней плотности теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона от фрактальной размерности его пористой структуры

Согласно данным, приведенным на рисунке 4.18, средние значения фрактальной размерности для исследованных марок составляют, соответственно, $D_p = 1,74 \pm 0,04$ для пенобетона марки по средней плотности $D300$, $1,82 \pm 0,03$ для пенобетона марки по средней плотности $D250$, $1,88 \pm 0,03$ для пенобетона марки по средней плотности $D200$ и $1,95 \pm 0,03$ для пенобетона марки по средней плотности

D_{150} , что позволяет построить графики зависимости D_p от средней плотности и проследить ее монотонный рост с уменьшением средней плотности материала. Таким образом, фрактальная размерность оказывается чувствительным интегральным показателем изменения морфологии пористой структуры в ряду марок по средней плотности.

4.5. Выводы

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

2. На основании экспериментальных данных и построенных математических моделей разработаны рациональные составы теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения марок по средней плотности D_{150} – D_{300} , обеспечивающих класс по прочности на сжатие $B_{0,35}$ – B_1 при коэффициенте теплопроводности $0,055$ – $0,065$ Вт/(м·°C). Установлено, что определяющим фактором, оказывающим наибольшее влияние на среднюю плотность и прочность на сжатие дисперсно-армированного пенобетона, является удельная поверхность цемента.

3. Микроструктурные исследования с применением сканирующей электронной микроскопии позволили установить характер взаимодействия полипропиленового волокна с пористой цементной матрицей. В составах теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марок по средней плотности D_{200} и D_{300} формируется развитая переходная зона на границе раздела «волокно–матрица», обогащенная продуктами гидратации (C-S-H гелем и портландитом), которая обеспечивает механическое сцепление полипропиленового волокна с матрицей и препятствует распространению микротрещин в межпоровых перегородках. В составах пенобетона марок по средней плотности D_{150} и D_{200} наблюдается более высокая пористость межпоровых перегородок и менее плотный контакт волокна с матрицей, что соответствует их пониженным прочностным показателям. Совместное действие

полипропиленовой фибры с установленными гео-метрическими параметрами приводит к снижению доли укрупненных пор теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона.

4. Методом фрактального анализа цифровых изображений пористой структуры установлены значения фрактальной размерности D_p для исследуемых марок пенобетона по средней плотности $D150$ – $D300$. Выявленная закономерность убывания фрактальной размерности с ростом средней плотности теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона отражает переход от разветвленной, высокоорганизованной пористой структуры при малой средней плотности к более однородной структуре при повышенной средней плотности.

5. Установлена корреляционная зависимость между фрактальной размерностью пористой структуры дисперсно-армированного пенобетона и его физико-механическими показателями, свидетельствующая о том, что фрактальная размерность может применяться в качестве обобщенного структурного параметра для неразрушающего прогнозирования прочности и теплопроводности материала. Полученные зависимости подтверждают перспективность использования фрактального анализа как инструмента контроля качества пористой структуры теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона на этапе технологической рационализации его состава.

5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПЕНОБЕТОНА И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1. Совершенствование технологической схемы производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Производство изделий из теплоизоляционного дисперсно армированного пенобетона представляет собой последовательный технологический процесс, организованный таким образом, чтобы обеспечить устойчивое качество материала при максимально полной переработке отходов после резки массива и обратного шлама. Основными компонентами дисперсно-армированного пенобетона являются цемент, вода, суперпластификатор, сульфат алюминия, пенообразователь, полипропиленовое волокно, а также обратный шлам, возвращаемый в начало схемы после резки и мойки оборудования. Процесс строится на автоматизированном дозировании компонентов, контролируемом смешивании и механизированном формовании изделий на многооперационной линии поддонов. Предлагаемая технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения представлена на рисунке 5.1.

Цемент из силоса, через систему сепарации и помола в роторно-шаровой мельнице (рисунок 2.8) направляется через дозирующее устройство в основной пенобетоносмеситель. В основной пенобетоносмеситель насосами через весовые дозаторы подается вода, суперпластификатор и сульфат алюминия. Пенообразователь и воду направляют в дозирующее устройство, где для каждого компонента формируются заданные расходные потоки, после чего они поступают в пеногенератор, где образуется рабочий раствор пенообразователя, который подается в основной пенобетоносмеситель. Полипропиленовое волокно, размещенное в отдельных емкостях, через узел дозирования вводят в основной пенобетоносмеситель совместно с обратным шламом для равномерного распределения по объему смеси.

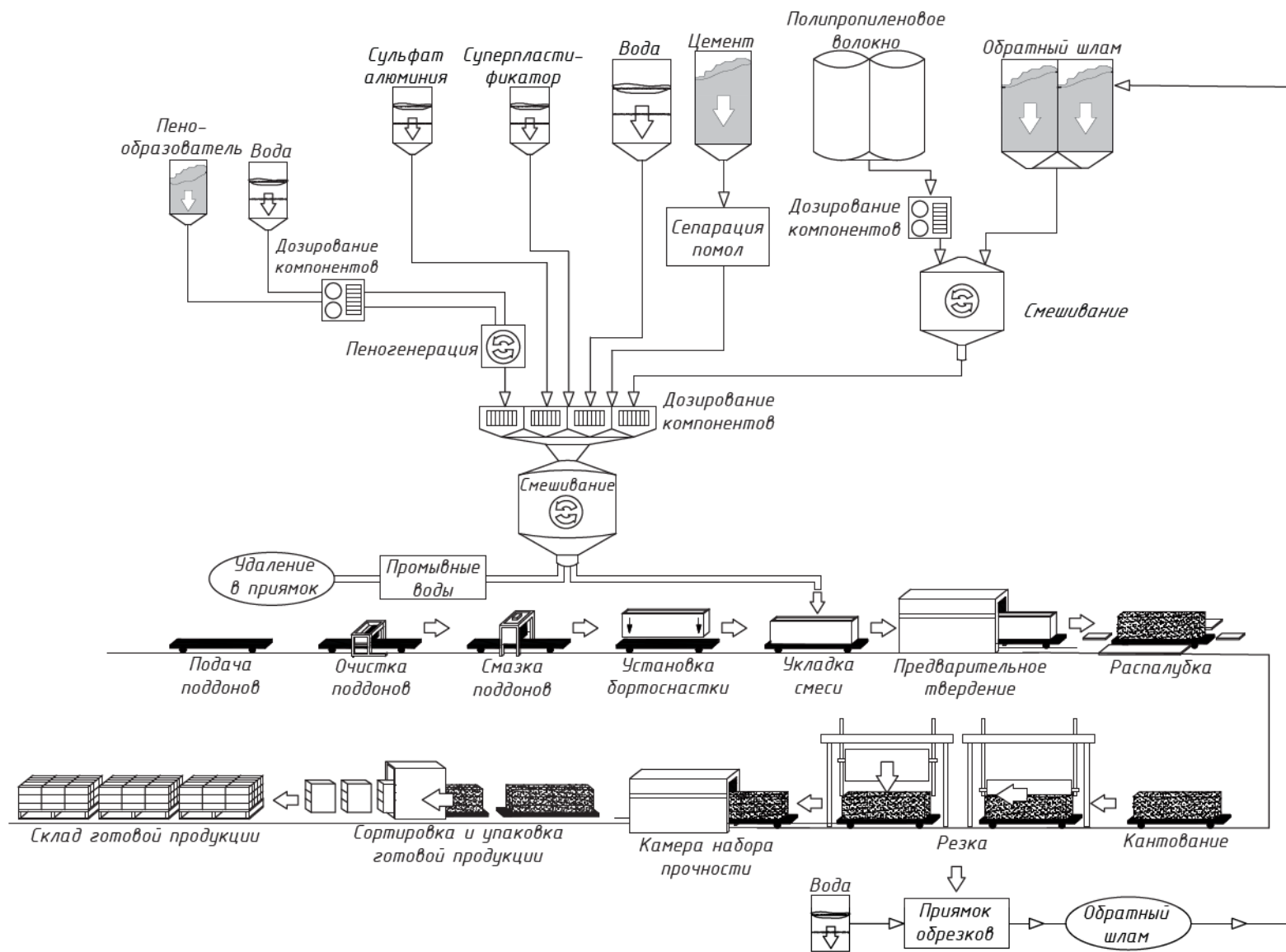


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе

На первом этапе цемент, воду, суперпластификатор и сульфат алюминия дозируют и последовательно подают в основной пенобетоносмеситель (рисунок 5.2) [220]. После полной загрузки компоненты цемент смешивают с водой и модифицирующими добавками в течение 60–120 с до реологической однородности.



Рисунок 5.2 – Пенобетоносмеситель
СПБУ-1000-ЛЮКС
(ООО «Стройтехнология») [220]



Рисунок 5.3 – Пеногенератор СПБл-60
(ООО «Стройтехнология») [220]

Параллельно с приготовлением цементной смеси готовят рабочий раствор пенообразователя. В дозирующем узле пенообразователь смешивают с водой до образования однородного раствора заданной концентрации, затем его подают в пеногенератор (рисунок 5.3) [220], где пену перемешивают 2 мин при частоте 3000 об/мин, оставляют настаиваться на 10 мин, после чего снова перемешивают 1 мин при той же частоте. Параметры пеногенерации поддерживают постоянными на протяжении всего перемешивания. Время между окончанием пеногенерации и подачей пены в основной пенобетоносмеситель сводят к минимуму, поскольку при длительном хранении жидкость отделяется от пены, пузырьки укрупняются, кратность снижается, устойчивость ухудшается. Пену вводят только после того, как цементная смесь стала однородной.

Для совместного равномерного смешивания в основном пенобетоносмесителе приготовленную пену постепенно подают равномерным потоком в цементный раствор, поддерживая пониженную частоту вращения рабочего органа. пенобетонную смесь перемешивают в течение 30–90 с. до полного равномерного распределения смеси, окончательную продолжительность перемешивания определяют по результатам подбора состава и оценки средней плотности.

Полипропиленовое волокно смешивают с обратным шламом в отдельном технологическом потоке. Шлам из системы переработки обрезков резки предварительно перемешивают с водой, пока твердая фаза равномерно не распределится в воде. Затем при непрерывном перемешивании небольшими порциями вводят волокна. Когда шламово-волоконистая композиция становится однородной, ее направляют в основной пенобетоносмеситель. Заключительное перемешивание длится 30–60 с. За это время распределяются волокна и обратный шлам, а сформированный пенный состав не разрушается. Затем готовую пенобетонную смесь по лоткам или трубопроводам направляют к формирующей линии поддонов, откуда она поступает на участок укладки.

Формование изделий осуществляется на поддонах, которые циркулируют по замкнутому конвейерному контуру. На входе в линию предусмотрена подача поддонов с накопителя, после чего они последовательно проходят через ряд операций подготовки. Сначала поддоны очищаются от остатков ранее сформированных массивов и загрязнений, что предотвращает прилипания массы и дефекты поверхности будущих изделий. Далее на рабочую поверхность наносится смазка, обеспечивающая легкую распалубку при снятии бортоснастки. Далее устанавливается бортоснастка, формирующая габариты массива пенобетона и задающая конфигурацию изделий. Внешний вид бортоснастки для заливки пенобетонного массива 1200×1200×600 мм представлен на рисунке 5.4 [220]. Каждая бортоснастка оснащена колесами и расположена на рельсовом пути.

После подготовки поддонов и установки бортов поддоны поступают к месту укладки пенобетонной смеси. Здесь посредством раздаточного устройства или

понижаемого желоба в форму равномерно укладывается пенобетонная смесь. В процессе укладки обеспечивается равномерное заполнение объема, исключается захват воздуха и разрывы структуры, чтобы сформировать сплошной массив с однородной пористой структурой. Загруженные поддоны направляются далее по конвейерной линии в зону предварительного твердения. На участке предварительного твердения массив пенобетона выдерживается 5-8 ч в контролируемых условиях твердения для набора прочности (температура $70 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительная влажность $95 \pm 5\%$).



Рисунок 5.4 – Внешний вид бортоснастки (ООО «Стройтехнология») [220]

После выхода из камеры предварительного твердения массивы пенобетона поступают на участок распалубки, где бортоснастка снимается, а затвердевший массив освобождается от формы. Далее массив подвергается кантованию: его поворачивают в рабочее положение, удобное для выполнения резки и последующих операций, при этом обеспечивается сохранность кромок и отсутствие повреждений поверхности.

Затем поддон с массивом пенобетона по рельсам подается на резательный комплекс «Мультирез-50» (рисунок 5.5) [220]. Резательный комплекс состоит из трех частей-порталов – поперечной, продольной и горизонтальной резки. На линии резки массив разрезается на плиты $1200 \times 600 \times 100$ мм ($600 \times 600 \times 100$ мм) в зависимости от номенклатуры. Срезанные обрезки и мелкие отходы не выбрасываются, а направляются в приямок обрезков, откуда поступают в систему подготовки обратного шлама.

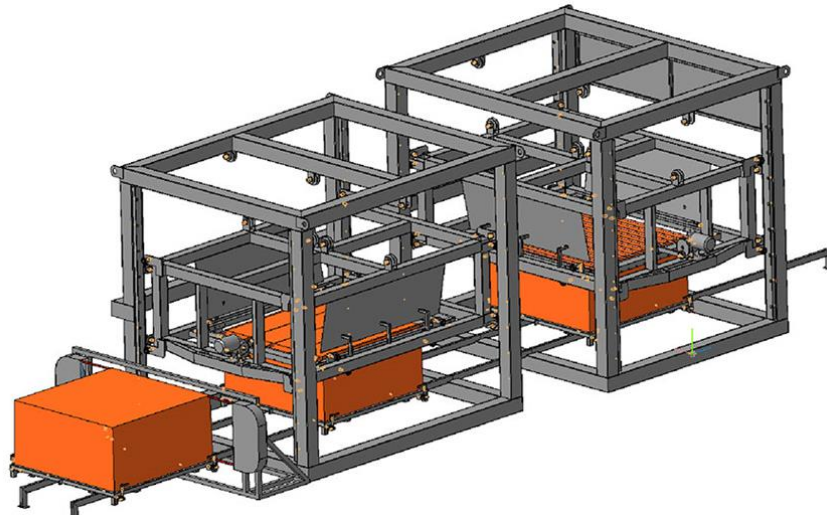


Рисунок 5.5 – Внешний вид резательного комплекса «Мультирез-50»
(ООО «Стройтехнология») [220]

После резки изделия могут дополнительно направляться в камеру набора прочности, где продолжается твердение пенобетона до достижения требуемых эксплуатационных характеристик. Использование организованной схемы кантования и резки позволяет обеспечить высокую точность геометрии изделий и минимизировать потери материала.

Технологическая схема предусматривает разветвленную систему работы с отходами процесса. Промывные воды от очистки поддонов и оборудования собираются и направляются в приямок обрезков, где твердая фаза отделяется и включается в состав обратного шлама. Обрезки дисперсно-армированного пенобетона, полученные на участке резки, также попадают в приямок обрезков и далее в емкость обратного шлама, оснащенную мешалкой для формирования однородной смеси, которая поступает в верхний блок хранения обратного шлама и используется при приготовлении смеси совместно с полипропиленовым волокном.

Плиты поступают на участок упаковки и сортировки для визуального контроля, отбраковки с дефектами и формируются партии по назначению. Плиты укладываются на поддоны, упаковываются для защиты от механических повреждений и воздействия влаги в процессе транспортирования и хранения. Паллеты отправляются на склад готовой продукции, где осуществляется краткосрочное или долгосрочное хранение до отгрузки потребителю.

Таким образом, технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе представляет собой взаимосвязанную систему участков – от подготовки сырья, пеногенерации и смешивания до формования, резки, обращения с обратным шламом и упаковки готовой продукции. Замкнутый цикл использования промывных вод и обрезков, механизированная линия поддонов и введение дисперсного волокна на стадии смешивания позволяют получать изделия с устойчивыми эксплуатационными характеристиками при рациональном использовании ресурсов и высокой степени автоматизации процесса.

5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона

Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий производства теплоизоляционных пенобетонов обусловлена необходимостью снижения материалоемкости ограждающих конструкций и себестоимости строительных материалов при одновременном повышении их эксплуатационных характеристик. В рамках настоящей работы технико-экономическая оценка проведена на основе расчета стоимости материалов на 1 м³ теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения для традиционного состава марки по средней плотности *D300* и разработанных составов марок по средней плотности *D150–D300* (таблицы 5.1–5.5).

Таблица 5.1 – Расчет стоимости материалов на 1 м³ для производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D300* традиционного состава

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Цемент	кг	270	10,5	2835
Вода	л	135	0,04	5,40
Пенообразователь «Rospena»	л	4,0	110	440
Полипропиленовая фибра 12 мм	кг	1,5	540	810
Суперпластификатор С-3	кг	1,5	138	207
Итого				4297,4

Таблица 5.2 – Расчет материальных затрат на 1 м³ для производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D150* разработанного состава

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Цемент	кг	118	10,5	1239
Вода	л	59	0,04	2,36
Пенообразователь «Foam X»	л	4,72	84	396,48
Сульфат алюминия	кг	1,18	35	41,3
Полипропиленовая фибра 6 и 12 мм	кг	0,9	540	486
Суперпластификатор Elocrete	кг	0,59	160	94,4
Помол в роторно-шаровой мельнице РШМ-МИКРОН	кВт·ч	2,19	6	13,14
			Итого	2272,68

Таблица 5.3 – Расчет материальных затрат на 1 м³ для производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D200* разработанного состава

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Цемент	кг	157	10,5	1648,50
Вода	л	94,2	0,04	3,77
Пенообразователь «Foam X»	л	6,28	84	527,52
Сульфат алюминия	кг	1,57	35	54,95
Полипропиленовая фибра 6 и 12 мм	кг	0,6	540	324
Суперпластификатор Elocrete	кг	0,79	160	126,40
Помол в роторно-шаровой мельнице РШМ-МИКРОН	кВт·ч	2,98	6	17,88
			Итого	2703,02

Таблица 5.4 – Расчет материальных затрат на 1 м³ для производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D250* разработанного состава

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Цемент	кг	196	10,5	2058
Вода	л	98	0,04	3,92
Пенообразователь «Foam X»	л	7,84	84	628,56
Сульфат алюминия	кг	1,96	35	68,6
Полипропиленовая фибра 6 и 12 мм	кг	0,6	540	324
Суперпластификатор Elocrete	кг	0,98	160	180,8
Помол в роторно-шаровой мельнице РШМ-МИКРОН	кВт·ч	3,81	6	22,86
			Итого	3262,74

Таблица 5.5 – Расчет материальных затрат на 1 м³ для производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавногo твердения марки по средней плотности *D300* разработанного состава

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Цемент	кг	226	10,5	2273
Вода	л	90,4	0,04	3,61
Пенообразователь «Foam X»	л	9,04	84	759,36
Сульфат алюминия	кг	2,26	35	79,10
Полипропиленовая фибра 6 и 12 мм	кг	1,2	540	648
Суперпластификатор Elocrete	кг	1,13	160	180,8
			Итого	3943,87

Традиционный состав пенобетона марки по средней плотности *D300* характеризуется повышенным расходом цемента – 270 кг, а суммарные затраты на основные сырьевые компоненты составляют 4297,4 руб. на 1 м³ пенобетона.

В разработанных составах марок по средней плотности *D150–D300* сочетаются несколько ресурсосберегающих решений, среди которых снижение расхода цемента, применение более эффективного пенообразователя «Foam X» и введение сульфата алюминия, а также дисперсное армирование полипропиленовой фиброй разной длины, использование высокоэффективного суперпластификатора Elocrete и механоактивация цемента в роторно-шаровой мельнице «РШМ-МИКРОН».

Суммарная стоимость материалов на 1 м³ разработанных составов находится в диапазоне от 2272,68 руб. для марки по средней плотности *D150* до 3943,87 руб. для марки по средней плотности *D300*. По сравнению с традиционным составом марки по средней плотности *D300* затраты снижаются примерно до 1,9 раз.

Максимальная годовая производительность технологической линии в рамках расчета принята равной 100 тыс. м³ в год. Ввиду того, что материальные затраты на получение пенобетона традиционного состава марки по средней плотности *D300* превышают затраты на разработанный состав на 353,53 руб. на 1 м³, годовая экономия при замене традиционного состава марки по средней плотности *D300* на разработанный состав той же марки по средней плотности может быть определена по формуле:

$$\mathcal{E}_{год} = (C_1 - C_2) B \quad (5.1)$$

где C_1 – базовая стоимость материальных затрат на 1 м³ пенобетона, руб.;
 C_2 – проектная стоимость материальных затрат на 1 м³ пенобетона, руб.;
 B – годовой выпуск продукции.

Годовая экономия составит:

$$\mathcal{E}_{год} = (4297,40 - 3943,87) \cdot 100\,000 = 35\,353\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, обоснована технико-экономическая эффективность разработанного состава пенобетона марки по средней плотности $D300$, обусловленная, с одной стороны, снижением материальных затрат примерно до 10 % за счет уменьшения расхода цемента и применения эффективных химических добавок при сохранении требуемой средней плотности, а с другой – значительной суммарной годовой экономией при промышленном масштабе производства порядка 35,3 млн руб. в год. Одновременно разработанные составы марок по средней плотности $D150$ – $D250$, имеющие еще более низкий расход вяжущего, обеспечивают дополнительный ресурсосберегающий эффект за счет снижения массы ограждающих конструкций и, как следствие, уменьшения нагрузки на несущие элементы здания, что согласуется с результатами комплексных исследований и рекомендациями по применению теплоизоляционных пенобетонов марок по средней плотности $D150$ – $D300$ в строительстве.

5.3. Внедрение и апробация результатов исследования

Для реализации результатов работы разработаны стандарт организации СТО 02066339-089-2025 «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон» (Приложение Е) и Рекомендации по производству теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона (Приложение Ж). Обоснована технико-экономическая эффективность модернизации технологии производства, обеспечивающей получения теплоизоляционного пенобетона марок по средней плотности $D150$ – $D300$.

Промышленная реализация результатов исследования осуществлялась в ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород), где была выпущена опытная партия

теплоизоляционных размером 1200×600×100 мм из дисперсно-армированного пенобетона.

Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Октябрьская в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. Выпущенная опытная партия плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона была использована при теплоизоляции чердачного перекрытия индивидуального жилого дома.

При производстве теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона применялись следующие сырьевые компоненты:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цемент»;
- пенообразователь «Foam X»;
- сульфат алюминия;
- суперпластификатор Elocrete;
- полипропиленовая фибра;
- вода.

При выпуске опытной партии теплоизоляционных плит из дисперсно-армированного пенобетона разработана система контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов, основанная на определении фрактальной размерности топологии пор теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона методом последовательного изменения разрешения изображения с последующей корреляцией полученных значений с физико-механическими характеристиками материала [229, 232].

Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона (Приложение И).

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство»; магистров по направлению 08.04.01 – «Строительство» (Приложение К).

5.4. Выводы

1. Предложена технологическая схема производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона неавтоклавного твердения и изделий на его основе, особенностью которой является последовательное перемешивание молотого цемента, суперпластификатора и сульфата алюминия, предварительно приготовленной пены и введение полипропиленовой фибры в состав пенобетонной смеси совместно с обратным шламом для исключения комкования волокон.

2. Обоснована технико-экономическая эффективность разработанного состава производства теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности $D300$, обусловленная, с одной стороны, снижением материальных затрат до 10 % при сохранении требуемой средней плотности и значительной суммарной годовой экономией при промышленном масштабе производства порядка 35,3 млн руб. в год.

3. Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Октябрьская в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород). Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-089-2025 «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон» и Рекомендации по производству 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 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.

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 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распоряжение Правительства РФ* от 09.06.2020 г. № 1523–р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 24. – С. 3847.
2. *Постановление Правительства РФ* от 09.09.2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2023. – № 38. – С. 6906.
3. *Постановление Правительства РФ* от 15.04.2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2014. – № 18 (ч. III). – С. 2167.
4. *World Energy Outlook 2024*. IEA, Paris. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024#overview>
5. *СП 50.13330.2024*. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23–02–2003. – М.: Минстрой России. – 2024.
6. *Федеральный закон РФ* от 23.11.2009 г. № 261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года). – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – С. 5711.
7. *Постановление Правительства РФ* от 27.09.2021 г. № 1628 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов». – 2021. – № 40. – С. 6851.
8. *Sadriev, A. R. World Patent Practice Analysis in the Area of Energy-Efficient and Energy-Saving Technologies / A. R. Sadriev // Mediterranean Journal of Social Sciences*. – 2014. – Vol. 5(18). – P. 283 – 288.

9. *Гущин, С. В.* Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С. В. Гущин, А. С. Семенов, Ч. Шень // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2020. – № 5. – С. 31 – 43.
10. *Wagh, Ch.* Thermal Properties of Foamed Concrete: A Review / Ch. Wagh, A. Kamisetty, I. S. R. Gandhi // 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development. – 2020. – Vol. 29. – P. 113 – 137.
11. *Revel, G. M.* Development and Experimental Evaluation of a Thermography Measurement System for Real-Time Monitoring of Comfort and Heat Rate Exchange in the Built Environment / G. M. Revel, E. Sabbatini, M. Arnesalo // Measurement Science and Technology. – 2012. – Vol. 23. – P. 035005.
12. *Гагарин, В. Г.* Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 192–200.
13. *Miller, D.* The contribution of structural design to green building rating systems: An industry perspective and comparison of life cycle energy considerations / D. Miller, J.-H. Doh, K. Panuwatwanich // Sustain Cities Soc. – 2015. – Vol. 16. – P. 39 – 48.
14. *Ли, Ц.* Текущая ситуация и развитие управления проектами «зеленого» строительства / Ц. Ли, Л. И. Миронова // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 399 – 402.
15. *Zeng, M. N.* Future of Green BIM Designing and Tools / M. N. Zeng // Adv. Mater. Res. – 2012. – Vol. 374. – P. 2557 – 2561.
16. *Теличенко, В. И.* Создание национальной системы «Зеленых» стандартов в РФ / В. И. Теличенко, А. А. Бенуж, Д. Н. Морозов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2019. – №3 – 4 (242–243). – С. 10 – 11.
17. *ГОСТ Р 54964–2023.* Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости. – М.: Стандартиформ, 2023.

18. *Крылов, Б. А.* Энергоэффективная технология производства пенобетонных изделий / Б. А. Крылов, В. В. Кириченко // Технологии бетонов. – 2013. – № 12(89). – С. 47 – 49.
19. *Бегич, Я. Э.* Исследование энергоэффективности систем фасадных теплоизоляционных композитных с разными видами теплоизоляции в резко-континентальном климате / Я. Э. Бегич, Н. В. Павленко, А. Д. Набережный [и др.] // Жилищное строительство. – 2025. – № 5. – С. 58-65.
20. *Пастушков, П. П.* О разработке методического пособия по расчету тепловой защиты и энергопотребления зданий с наружными ограждающими конструкциями из автоклавных ячеистобетонных изделий / П. П. Пастушков, А. А. Шеболдасов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2022. – № 6(275). – С. 11-14.
21. *Попов, А. Л.* Особо легкий бетон как основной материал для наружных стен жилых и общественных зданий в холодных регионах: анализ состояния и перспективы развития / А. Л. Попов // Жилищное строительство. – 2026. – № 5. – С. 20-38.
22. *Amran, Y. H. M.* Properties and applications of foamed concrete; a review / Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, A. A. A. Ali // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 101. – P. 990–1005.
23. *Fu, Y.* Foam Concrete: A State of the Art and State of the Practice Review / Y. Fu, X. Wang, L. Wang, Y. Li // Advances in Materials Science and Engineering. – 2020. – P. 6153602.
24. *Сулейманова, Л. А.* Применение композиционных вяжущих в технологии ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. В. Марушко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 2. – С. 10-16.
25. *Шахова, Л. Д.* Технология пенобетона. Теория и практика: монография / Л. Д. Шахова. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 248 с.
26. *Оглоблин, М. И.* История развития газобетона / М. И. Оглоблин, В. А. Невский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4(27). – С. 216.

27. *Aircrete Europe*. History of Autoclaved Aerated Concrete [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aircrete.com/aircrete-news/history-of-autoclaved-aerated-concrete-2>

28. *Amran, M.* Fibre–Reinforced Foamed Concretes: A Review / M. Amran, R. Fediuk, N. Vatin, Y.H. Lee, G. Murali, T. Ozbakkaloglu, S. Klyuev, H. Alabduljabbar // *Materials*. – 2020, – Vol. 13, № 19. – P. 4323.

29. *Xella Group*. 100 years of autoclaved aerated concrete: How an idea revolutionized construction [Электронный ресурс]. – URL: <https://news.xella.com/company/100-years-of-autoclaved-aerated-concrete-how-an-idea-revolutionized-construction>

30. *Bozsaky, D.* The historical development of thermal insulation materials / D. Bozsaky // *Periodica Polytechnica Architecture*. – 2010. – Vol. 41(2). – P. 49–56.

31. *Rushton, T.* Reinforced autoclaved aerated concrete: The history and development of the product, its characteristics, uses and shortcomings / T. Rushton // *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation*. – 2024. – Vol. 13(2). – P.102–116.

32. *Жантуев, Р. М.* История создания пенобетона / Р. М. Жантуев, И. А. Терещенко // *Наука. Новое поколение. Успех: Материалы IV международной научно–практической конференции*. – Краснодар: Изд–во «Новация», 2023. – С. 164–166.

33. *Koutsouradi, A.* Experimental Investigations of the Properties of Foam Concrete for Utilisation as Crushed Lightweight Aggregates in Building Slabs / A. Koutsouradi, P. S. Halding, K. K. Hansen // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15(17). – P. 9771.

34. *Levchenko, V.* Production of AAC in Russia: History, present stage, perspectives / V. Levchenko // *Cement Wapno Beton*. – 2011. – Special Issue. – P. 126–128.

35. *ГОСТ 25485–2019*. Бетоны ячеистые. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019.

36. Юдович, Б. Э. Субмикроструктурный пенобетон: новое в основах технологии Часть I / Б. Э. Юдович, С. А. Зубехин // Цемент и его применение. – 2009. – № 1. – С. 81–85.

37. Баранов, И. М. Новые эффективные строительные материалы для создания конкурентных производств / И. М. Баранов // Строительные материалы. – 2001. – № 2. – С. 26–28.

38. Гринфельд, Г. И. Ограждающие конструкции с применением автоклавного газобетона в Санкт–Петербурге: проблемы, пути решения / Г. И. Гринфельд // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2010. – № 1(13). – С. 76–82.

39. Сулейманова, Л. А. Газобетон неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих / Л. А. Сулейманова, В. С. Лесовик. – Белгород: Изд–во БГТУ, 2013. – 304 с.

40. Ткаченко, Т. Ф. Совершенствование технологии неавтоклавных пенобетонов / Т. Ф. Ткаченко, В.Т. Перцев// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно–строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 4. – С. 243–250.

41. Дьяченко, Л. Ю. Выбор оптимального решения тепловой изоляции наружных ограждающих конструкций / Л. Ю. Дьяченко, Д. Н. Сербиченко, О. С. Дьяченко, М. Р. Васильченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 3(192). – С. 43–50.

42. Пастушков, П. П. Нововведения в нормативных документах РФ по тепловой защите и энергосбережению, касающиеся автоклавных ячеистых бетонов / П. П. Пастушков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2022. – № 5(274). – С. 15–17.

43. Ухова, Т. А. Неавтоклавный поробетон – эффективный материал для однослойных стеновых конструкций / Т. А. Ухова, Е. С. Фискинд // Технологии бетонов. – 2012. – № 7–8(72–73). – С. 69–70.

44. ГОСТ 5742-2021. Изделия из ячеистых бетонов теплоизоляционные. Технические условия. Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022.

45. *ГОСТ Р 70522-2022*. Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия. Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022.
46. *BusinesStat*. Анализ рынка теплозвукоизоляционных материалов и изделий в России в 2020–2024 гг., прогноз на 2025–2029 гг. [Электронный ресурс]. – URL: <https://marketing.rbc.ru/research/47777/>
47. *РБК Магазин исследований* [Электронный ресурс]. – URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/15942/>
48. *Пастушков, П. П.* Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства / В. Г. Гагарин, Д. А. Ильин, И. Ф. Нагаев // *Строительные материалы*. – 2022. – № 6. – С. 30-34.
49. *Рынок теплоизоляционных материалов в России, 2026 г.* // *TK Solutions* [Электронный ресурс]. – URL: <https://tk-solutions.ru/store/report/rynok-teploizolacionnykh-materialov-v-rossii>
50. *Подведены итоги рынка теплоизоляционных материалов России* // *Строительная информация* [Электронный ресурс]. – URL: <https://bestresearch.ru/article/news.html>
51. *Mordor Intelligence*. Cellular Concrete Market – Size, Share & Trends Analysis 2025–2030 / *Mordor Intelligence* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/cellular-concrete-market>
52. *Grand View Research*. Cellular Foam Concrete Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2025–2030 / *Grand View Research* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cellular-foam-concrete-market-report>
53. *Muksunov, A. A.* Improving the Quality of Mortar Mixtures Using a Mineral Modifier Based on Aluminosilicate Raw Materials / A. A. Muksunov, A. L. Popov, V. V. Strokova // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2026. – No. 1(69). – P. 81-88.
54. *Попов, А. Л.* Особенности реологических и гидратационных свойств цементсодержащих дисперсных систем с кварц-полевошпатовым песком /

А. Л. Попов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 7(799). – С. 67-78.

55. *Бартеньева, Е. А.* Особенности структурообразования ячеистого бетона с кальцийсодержащими силикатными добавками / Е. А. Бартеньева, Л. В. Ильина // Эксперт: теория и практика. – 2024. – № 3(26). – С. 34-40.

56. *Торпищев, Ш. К.* Перспективы повышения и эффективности неавтоклавного пенобетона / Ш. К. Торпищев, Ф. Ш. Торпищев // Наука и техника Казахстана. – 2005. – № 3. – С. 161–172.

57. *Альваши, Ф. А. А.* Влияние комплексной минеральной добавки на структурообразование цементного камня / А. С. Иноземцев, Б. И. Булгаков, О. Б. Ляпидевская // Техника и технология силикатов. – 2026. – Т. 33, № 1. – С. 81-93.

58. *Попов, А. Л.* Пенобетон автоклавного твердения на основе композиционного вяжущего / А. Л. Попов, В. В. Строкова, В. В. Нелюбова. – Белгород, Якутск: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2024. – 167 с.

59. *Иванов, А. Н.* Пенобетон заданной средней плотности для утепления чердачных перекрытий / А. Н. Иванов, М. А. Трембицкий // Инженерно–строительный журнал. – 2011. – № 8 (26). – С. 19–24.

60. *Шахова, Л. Д.* Роль цемента в технологии пенобетонов / Л. Д. Шахова, Ш. М. Рахимбаев, Е. С. Черноситова, С. А. Самборский // Строительные материалы. – 2005. – № 1. – С. 42–44.

61. *Степанова, М. П.* Роль влажностного фактора при формировании структуры портландитового камня контактно–конденсационного твердения / М. П. Степанова // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы XIV Международной научно–технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2019. – С. 138–143.

62. *Leonovich, S. N.* Heat-Resistant Foam Concrete on the Basis of Two-Component Binder / S. N. Leonovich, D. V. Sviridov, A. L. Belanovich // Science and Technique. – 2019. – Vol. 18, No. 2. – P. 121–126.

63. *Vasilovskaya, N. G.* Influence of Basalt Fibre on Foam Concrete Structure / N. G. Vasilovskaya, I. G. Endzhievskaya, I. G. Kalugin // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2014. – Vol. 7, No. 6. – P. 689–697.

64. *Добшиц, Л. М.* Прочность и долговечность бетонов в зависимости от дисперсности цемента и наполнителей / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. – М.: МГСУ, 2014. – Том 3. – С. 279–290.

65. *Рекомендации по изготовлению и применению изделий из неавтоклавного ячеистого бетона.* – М.: НИИЖБ, 2003 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200074906>.

66. *Shi, C.* New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement / C. Shi, A. F. Jiménez, A. Palomo // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41, № 7. – P. 750–763.

67. *Ефремов, А. Н.* Технологические свойства неавтоклавных шлакощелочных пенобетонов с использованием зол ТЭС / А. Н. Ефремов, Д. Г. Малинин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – № 4(150). – С. 98–102.

68. *Плотников, В. В.* Повышение долговечности монолитного пенобетона низкой плотности путем модифицирования цемента активированными кристаллогидратами / В. В. Плотников, М. В. Ботаговский // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 10. – С. 33–39.

69. *Шуляк, Е. Ю.* Газобетон неавтоклавного твердения на основе смешанного известково-цементного вяжущего и техногенного известняка: автореф. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шуляк Елена Юрьевна. – Иваново, 2016. – 22 с.

70. *Погорелова, И. А.* Сухие строительные смеси для неавтоклавных ячеистых бетонов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Погорелова Инна Александровна. – Белгород, 2009. – 195 с.

71. *Денисова, Д. А.* Способы усовершенствования свойств неавтоклавных ячеистых бетонов модифицированием компонентов сырьевого материала / Д. А. Денисова, А. П. Сибирянский // Современные строительные материалы и технологии. – Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2019. – С. 72–81.

72. *Свинцов, А. П.* Легкий строительный материал на основе быстротвердеющих вяжущих / А. П. Свинцов, Ю. В. Николенко, К. В. Квартенко // Строительные материалы. – 2010. – № 12. – С. 47–51.

73. *Назарова, А. В.* Модифицированные пенобетоны неавтоклавного твердения в современном строительном производстве / А. В. Назарова, С. В. Сороканич, Е. М. Вишторский, А. А. Ткачев. – Москва: Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – 98 с.

74. *Лобачева, Д. М.* Исследования изменения теплопроводности газонаполненных теплоизоляционных материалов во времени / Д. М. Лобачева, П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, А. С. Кубенин // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2024. – № 6(1078). – С. 43-45.

75. *Солонина, В. А.* Синтез структур ячеистобетонных композитов с наноразмерными компонентами / В. А. Солонина, Г. А. Зимакова, Д. С. Баянов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 7(106). – С. 733–740.

76. *Нецвет, Д. Д.* Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов / Д. Д. Нецвет, В. В. Нелюбова, В. В. Строкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 4. – С. 122–131.

77. *Попов, А. Л.* Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего на основе кварц-полевошпатового песка Якутии: дис.

... канд. техн. наук: 05.23.05 / Попов Александр Леонидович. – Белгород, 2019. – 252 с.

78. Кожухова, Н. И. Опыт производства ячеистых бетонов на основе геополимерных вяжущих / Н. И. Кожухова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 4. – С. 8–22.

79. Гурова, Е. В. Исследование влияния условий гидролиза на свойства белковых пенообразователей / Е. В. Гурова // ОНВ. – 2007. – №1 (52). – С. 74–76.

80. Черкасов, В. Д. Исследование механизма действия пенообразователей в цементных композитах / В. Д. Черкасов, А. И. Емельянов // Региональная архитектура и строительство. – 2025. – № 4(65). – С. 5–10.

81. Коломацкий, А. С. Природа пенообразователя и свойства цементной матрицы / А. С. Коломацкий, О. К. Безродный, С. А. Коломацкий // Строительные материалы. – 2009. – № 11. – С. 18–20.

82. Баранова, А. А. Природа пенообразователя и свойства цементной матрицы / А. А. Баранова, А. И. Савенков, П. А. Шустов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2016. – № 3(18). – С. 63–70.

83. Винокурова, О. В. Особенности определения состава пенобетона / О. В. Винокурова, А. А. Баранова // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2022. – №. 1. – С. 155–156.

84. Черкасов, В. Д. Пенообразователи из белков микробного синтеза для производства ячеистых бетонов / В. Д. Черкасов, В. И. Бузулуков, Ю. М. Баженов // Строительные материалы. – 2016. – № 9. – С. 53–57.

85. Черкасов, В. Д. Пенобетоны на основе пенообразователя микробного синтеза / В. Д. Черкасов, В. В. Ерастов, В. В. Ушкина // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9–3. – С. 523–527.

86. Марков, С. В. Белковый пенообразователь для производства ячеистых бетонов зданий и сооружений / С. В. Марков, В. Д. Черкасов, В. В. Ушкина // Естественные и технические науки. – 2015. – № 5(83). – С. 190–192.

87. Гурова, Е. В. Повышение плотности и обеспечение требуемой вязкости белковых пенообразователей для пенобетона путем изменения температуры и

продолжительности гидролиза / Е. В. Гурова // Омский научный вестник. – 2007. – № 3(60). – С. 29–31.

88. *Ахмедов, М. Ф.* Пенообразователи для производства пенобетона / М. Ф. Ахмедов, А. Шарифов, Г. Г. Шодиев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 146–150.

89. *Стельмах, С. А.* Исследование влияния некоторых видов пенообразователя на свойства конструкционно–теплоизоляционных пенобетонов / С. А. Стельмах, Е. М. Щербань, М. П. Нажуев // Строительство и архитектура – 2017. Инженерно–строительный факультет: Материалы научно–практической конференции. – Ростов–на–Дону: Донской государственный технический университет, 2017. – С. 91–97.

90. *Бартеньева, Е. А.* Формирование устойчивой пенной структуры в технологии пенобетона / Е. А. Бартеньева, Л. В. Ильина, И. М. Себелев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 10(790). – С. 87–98.

91. *ГОСТ 30459–2008.* Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. – М.: Стандартинформ, 2009.

92. *Баранова, А. А.* Неавтоклавный пенобетон с применением модифицирующих добавок / А. А. Баранова, О. И. Язина // Вестник Амурского государственного технического университета. – 2020. – № 58. – С. 111–114.

93. *Савенков, А. И.* Пенобетон теплоизоляционный с применением пластификаторов нового поколения / А. И. Савенков, А. А. Баранова // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 3(48). – С. 70–73.

94. *Гусейнова, В. В.* Модифицирование неавтоклавных пенобетонов одностадийного приготовления суперпластификатором С–3 и электролитами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Гусейнова Виктория Викторовна. – Ростов–на–Дону, 2006. – 168 с.

95. *Муксунов, А. А.* Улучшение качества растворных смесей с использованием минерального модификатора на основе алюмосиликатного сырья / А. А. Муксунов, А. Л. Попов, В. В. Строкова // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2025. – № 2(78). – С. 78–87.

96. *Бартеньева, Е. А.* Неавтоклавный пенобетон с минеральными добавками / Е. А. Бартеньева, Н. А. Машкин // Современное строительство и архитектура. – 2017. – № 1(05). – С. 15–17.
97. *Страхов, А. В.* Повышение гидрофобности пенобетона углеродсодержащими наполнителями / А. В. Страхов, Ю. Г. Иващенко, Д. Ю. Багапова // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 2(16). [Электронный ресурс]. – URL: trts.esrae.ru/31-171
98. *Сивков, С. П.* Влияние модифицированных гидрофобных добавок на свойства цементных растворов и бетонов / С. П. Сивков, Е. А. Косинов // Технологии бетонов. – 2010. – № 7–8(48–49). – С. 35–37.
99. *Рыскалиев, М. Ж.* Изучение свойств пенобетона, модифицированного химическими добавками / М. Ж. Рыскалиев, А. А. Таудаева // Парадигма. – 2021. – № 4. – С. 47–56.
100. *Низина, Т. А.* Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов / Т. А. Низина, А. В. Балбалин // Вестник ТГАСУ. 2012. №2. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-mineralnyh-dobavok-na-reologicheskie-i-prochnostnye-harakteristiki-tsementnyh-kompozitov>.
101. *Баранова, А. А.* Эффективный пенобетон с добавкой микрокремнезема / А. А. Баранова, А. И. Савенков, Е. Д. Балханова // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 6(57). – С. 9–14.
102. *ГОСТ 25818–2017.* Зола–уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018.
103. *Пузатова, А. В.* Зола–уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей / А. В. Пузатова, М. А. Дмитриева, А. А. Захаров, В. Н. Лейцин // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 5 (109). – С. 132–147.
104. *Бартеньева, Е. А.* Неавтоклавный теплоизоляционный пенобетон на основе техногенных отходов / Е. А. Бартеньева, Н. А. Машкин // Актуальные вопросы строительного материаловедения материалы Всероссийской

научно–практической конференции, Улан–Удэ, 21–24 июля 2021 года. – Улан–Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, 2021. – С. 10–15.

105. *Маркович, А. С.* Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов / А. С. Маркович, Д. А. Милосердова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 182–192.

106. *Рабинович, Ф. Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 640 с.

107. *Алпатов, А. А.* Дисперсное армирование цементных систем аморфной стеклометаллической фиброй / А. А. Алпатов, П. П. Умнов, А. С. Иноземцев [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2024. – № 5. – С. 17-24.

108. *Флек, Л. В.* Теоретическое и прикладное материаловедение / Л. В. Флек. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

109. *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.

110. *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.

111. *Пухаренко, Ю. В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Пухаренко Юрий Владимирович. – СПб., 2004. – 43 с.

112. *Моргун, В. Н.* Влияние вида дисперсной арматуры на свойства пенобетонов / В. Н. Моргун, Б. В. Талпа // Строительные материалы. – 2008. – № 6. – С. 48–49.

113. *Mydin, A. O.* Effect of polypropylene fiber content on flexural strength of lightweight foamed concrete at ambient and elevated temperatures / A. O. Mydin, S. Soleimanzadeh // *Adv. Appl. Sci. Res.* – 2012. – Vol. 3. – P. 2837–2846.

114. *Суворов, И. О.* Дисперсное полиармирование как способ снижения усадки фибропенобетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Суворов Иван Олегович. – СПб.: СПбГАСУ, 2015. – 160 с.

115. *Строцкий, В. Н.* Дисперсное армирование ячеистого бетона как фактор улучшения его физико–механических свойств / В. Н. Строцкий, А. М. Крохин, В. И. Савин, С. Г. Зимин // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2020. – № 1 (24). – С. 132–147.

116. *Моргун, Л. В.* Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: Теория и методология рецептурно–технологического проектирования: дис. ... д–ра техн. наук: 05.23.05 / Моргун Любовь Васильевна. – Белгород, 2005. – 336 с.

117. *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.

118. *Моргун, В. Н.* Конструкционные возможности фибропенобетона неавтоклавного твердения / В. Н. Моргун, А. Ю. Богатина, Л. В. Моргун, П. В. Смирнова // *Строительные материалы*. – 2012. – №4. – С. 14–16.

119. *Fernandes, P. A. L.* Study of a self–compacting fiber–reinforced concrete to be applied in the precast industry / P. A. L. Fernandes, J. Veludo, N. Almeida, J. Baptista, H. Rodrigues // *Innov. Infrastruct. Solut.* – 2018. – No 3. – P. 28.

120. *Василовская, Н. Г.* Управление структурой ячеистых фибробетонов / Н. Г. Василовская, И. Г. Енджиевская, И. Г. Калугин // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2010. – №11(12). – С. 17–20.

121. *Ивлева, А. Р.* Влияние лигнина и гемицеллюлозы на адсорбционные свойства растительных волокон / А. Р. Ивлева, А. В. Канарский, Я. В. Казаков,

Ю.В. Севастьянова // Вестник технологического университета. – 2015. – №17. – С. 123–125.

122. *Xu, R.* Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete / R. Xu, T. He, Y. Da, Y. Liu, J. Li, C. Chen // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – No 208. – Pp. 242–249.

123. *Peña–Pichardo, P.* Recovery of cotton fibers from waste Blue–Jeans and its use in polyester concrete / P. Peña–Pichardo, G. Martínez–Barrera, M. Martínez–López, F. Ureña–Núñez, J. Reis // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – No 177. – P. 409–416.

124. *Fedyuk, R. S.* Self–compacting concrete using pretreated rice husk ash / R. S. Fedyuk, V. S. Lesovik, A. P. Svintsov, A. V. Mochalov, S. V. Kulichkov, N. Y. Stoyushko, N. A. Gladkova, R. A. Timokhin // *Mag. Civ. Eng.* – 2018. – Vol. 3. – P. 66–76.

125. *Mahesh, G. G.* Experimental study on foam concrete with polypropylene fibers and Nylon fibers / G. G. Mahesh, V.V. Satyanarayana // *AIP Conference Proceedings.* – 2021. – No 2358. – P. 020008.

126. *Son, M.* Effects of the strain rate and fiber blending ratio on the tensile behavior of hooked steel fiber and polyvinyl alcohol fiber hybrid reinforced cementitious composites / M. Son, G. Kim, H. Kim, S. Lee, J. Nam, K. Kobayashi // *Cem. Concr. Compos.* – 2020. – No 106. – P. 103482.

127. *Белова, Н. А.* Композитные материалы на основе углеродных волокон / Н. А. Белова // *Молодой ученый.* – 2015. – № 24.1(104.1). – С. 5–7.

128. *Ружинский, С. А.* Все о пенобетоне / С. А. Ружинский, А. Б. Портник, А. В. Савиных. – С–Пб.: ООО «Стройбетон», 2006. – 630 с.

129. *Кривошапкин, П. В.* Основы коллоидной химии. Поверхностные явления и системы / П. В. Кривошапкин, Е. Ф. Кривошапкина, Е. А. Назарова, В. В. Сталюгин. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 138 с.

130. *Дерягин, Б. В.* Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / Б. В. Дерягин. – М.: Наука, 1986. – 206 с.

131. *Шелудко, А.* Об электростатическом отталкивании между диффузными электрическими слоями в двусторонних жидких пленках / А. Шелудко, Д. Ексерова // ДАН СССР. – 1959. – Т. 127, №1. – С.149-151.
132. *Морозова, М. А.* Теплопроводность и вязкость нано жидкостей: диссертация ... кандидата физико–математических наук: 01.04.14 / Морозова Марина Анатольевна. – Новосибирск, 2019. – 103 с.
133. *Einstein, A.* A new determination of molecular dimensions //Annalen der Physik. – 1906. – №.19. – С. 289–306.
134. *Batchelor, G. K.* Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction //Journal of Fluid Mechanics. – 1976. – Т. 74. – №. 1. – С. 1–29.
135. *Chen, B.* Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability / B. Chen, J. Liu // Cem. Concr. Res. – 2005. – Vol. 35. – P. 913–917.
136. *Кудяков, А. И.* Теплоизоляционный цементный пенобетон неавтоклавного твердения с золой гидроудаления / А. И. Кудяков, А. Б. Стешенко, Н. П. Душенин, Н. Е. Рябцева // Вестник Томского государственного архитектурно–строительного университета. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 105–117.
137. *Liu, Z.* Effect of Water–Cement Ratio on Pore Structure and Strength of Foam Concrete / Z. Liu, K. Zhao, C. Hu, Y. Tang // Advances in Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 9520294.
138. *Lesovik, V. S.* Durability behaviors of foam concrete made of binder composites / V. S. Lesovik, E. S. Glagolev, V. V. Voronov, L. Kh. Zagorodnyuk, R. S. Fediuk et al. // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 100, № 8. – Article No. 10003.
139. *Ержанов, С. Е.* Снижение усадки неавтоклавных пенобетонов на основе бесцементных гидравлических вяжущих из отходов производств / С. Е. Ержанов, М. С. Садуакасов, В. А. Лапин и др. // Вода: химия и экология. – 2022. – № 3. – С. 42–52.
140. *Стешенко, А. Б.* Конструкционно–теплоизоляционный пенобетон для индивидуального монолитного жилищного строительства / А. Б. Стешенко,

А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 320–328.

141. *Винокурова, А. И.* О целесообразности использования пластификаторов в производстве теплоизоляционного пенобетона / А. И. Винокурова, И. А. Иваненко // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 432–439.

142. *Иноземцев, А. С.* Модель высокопрочного легкого бетона / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 34–41.

143. *Стешенко, А. Б.* Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих конструкций повышенного качества / А. Б. Стешенко, А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15, № 5. – С. 408–417.

144. *Савенков, А. И.* Пенобетон теплоизоляционный с применением пластификаторов нового поколения / А. И. Савенков, А. А. Баранова // Вестник Восточно–Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2014. – № 3 (48). – С. 70–73.

145. *Li, C.* Effect of maintenance and water–cement ratio on foamed concrete shrinkage cracking / C. Li // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 13. – Article 2703.

146. *Alyousef, R.* Comparative study on the performance of protein and synthetic foaming agents in the preparation of foam concrete / R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mohamed et al. // Case Studies in Construction Materials. – 2021. – Vol. 14. – Article e00524.

147. *Машкин, Н. А.* Неавтоклавный пенобетон, дисперсно–армированный минеральными и волокнистыми добавками / Н. А. Машкин, А. И. Кудяков, Е. А. Бартеньева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 8 (716). – С. 58–68.

148. Вишторский, А. Л. Оценка свойств некоторых пенообразователей для пенобетонов неавтоклавного твердения / А. Л. Вишторский // Вестник ДонНАСА. – 2018. – № 4 (132). – Т. 2. – С. 121–126.

149. Falliano, D. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density / D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, E. Gugliandolo // Constr. Build. Mater. – 2018. – Vol. 165. – P. 735–749.

150. Моргун, В. Н. Одностадийная технология пенобетона и ее влияние на качество стеновых материалов / В. Н. Моргун, Л. В. Моргун, В. В. Нагорский // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10397>

151. Моргун, В. Н. О динамике улучшения технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми волокнами / В. Н. Моргун // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 4. – С. 69–76.

152. Iawan, T. Mechanical Properties of Foamed Concrete with Additional Pineapple Fiber and Polypropylene Fiber / T. Iawan, Saloma, Y. Idris // J. Phys. Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1198. – P. 082018.

153. Zhang, S. Study on Properties of Fiber Reinforced Foam Concrete / S. Zhang, Z. Lin, Y. Chen // Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Structures. – Purdue University. – 2020. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icdcs/2020/material/6/>

154. Пухаренко, Ю. В. Эффективность армирования неавтоклавного пенобетона синтетической микро- и макрофиброй / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2022. – № 2(67). – С. 20-27.

155. Latifi, M. R. Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties / M. R. Latifi, Ö. Biricik, A. Mardani–Aghabaglou // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2022. – Vol. 36, № 4. – P. 345–369.

156. *Abdykalykov, A.* Investigation of the uniform distribution of basalt fibre in a foam concrete mixture / A. Abdykalykov, T. Kasymov, B. Barpiev, T. Bolotov, N. Kudaibergenova // Architectural Studies. – 2024. – Vol. 10, No. 2. – P. 64–75.

157. *Gencel, O.* Basalt fiber–reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study / O. Gencel, M. Nodehi, O. Yavuz Bayraktar, G. Kaplan, A. Benli, A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 326. – Article 126861.

158. *Feng, S.* Influence of fibers and bubble structure on thermal conductivity and mechanical performances of foam concrete / S. Feng, Y. Gao, H. Xiao, C. Xue // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 445. – Article 137956.

159. *Li, J.* Fiber Treatment for Improving Foam Concrete Flexural Behavior / J. Li, T. Kim, A. Hajimohammadi // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2025. – Vol. 37, No. 6. – P. 04025151–1.

160. *Falliano, D.* Stability, flexural behavior and compressive strength of ultra–lightweight fiber–reinforced foamed concrete with dry density lower than 100 kg/m³ / D. Falliano, S. Parmigiani, D. Suarez–Riera et al. // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 51. – Article 104329.

161. *Моргун, Л. В.* Материалы и современные конструктивные решения для строительных сооружений / Л. В. Моргун, А. Ю. Богаткина, В. Н. Моргун // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – Т. 46, № 4. – С. 167–175.

162. *Falliano, D.* Compressive and flexural strength of fiber–reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density / D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, E. Gugliandolo // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 198. – P. 479–493.

163. *Моргун, В. Н.* Обоснование одного из методов совершенствования структуры пенобетонов / В. Н. Моргун, Л. В. Моргун // Строительные материалы. – 2018. – № 5 (759). – С. 24–26.

164. *Моргун, В. Н.* Структура межпоровых перегородок в пенобетонных смесях / В. Н. Моргун, Л. В. Моргун // Строительные материалы. – 2014. – № 4. – С. 84–86.

165. *Моргун, Л. В.* Влияние диаметра дисперсной арматуры на скорость фазового перехода в пенобетонных смесях / Л. В. Моргун, Д. А. Вотрин, В. Н. Моргун // Строительные материалы. – 2018. – № 11. – С. 27–30.

166. *Хватынец, В. А.* Эффективность применения фибры в пенобетонах неавтоклавногo твердения / В. А. Хватынец // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета. – 2017. – Вып. 19 (89): Прикладные науки. Строительство. – С. 109–111.

167. *Batool, F.* Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam: A review / F. Batool, M. M. Rafi, V. Bindiganavile // J. Build. Eng. – 2018. – Vol. 20. – p. 696–704.

168. *Lukpanov, R. E.* Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming / R. E. Lukpanov, D. S. Dyusseminov, Ye. B. Utepov, D. O. Bazarbayev, D. V. Tsygulyov, S. B. Yenkebayev, Zh. A. Shakhnov // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – № 103(3). – Article No. 10313.

169. *Liu, C.* Characterization of pore structure parameters of foam concrete by 3D reconstruction and image analysis / C. Liu, X. Yu, Y. Zhang, Q. Wang // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 267. – Article 120958.

170. *Banthia, N.* Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedded fibre length / N. Banthia, M. Sappakittipakorn, et al. // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 141. – P. 170–183.

171. *Zheng, G.* Study on Properties of Fiber Reinforced Foam Concrete / G. Zheng // International Conference on Durability of Concrete Structures. – Purdue University, 2022. – URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icdcs/2022/parti/17>

172. *Akbulut, Z. F.* Synergistic Effects of Polypropylene Fibers and Silica Fume on Structural Lightweight Concrete: Analysis of Workability, Thermal Conductivity, and Strength Properties / Z. F. Akbulut, E. Kuzielová, T. A. Tawfik, P. Smarzewski, S. Guler // Materials. – 2024. – Vol. 17(20). – P. 5042.

173. *Li, Z.* Optimization Design of Mix Proportion for Fly Ash–Silica Fume–Basalt Fiber–Polypropylene Fiber Concrete under Steam Curing Condition / Z. Li, G. Li, C. Wang, W. Li, H. Zheng // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 9. – Article 1971.

174. *Зайцева, М. В.* Обеспечение качества контроля строительной продукции / М. В. Зайцева, Т. В. Учаева, В. И. Логанина // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2024. – № 3(284). – С. 18-21.

175. *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: Сборник докладов*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2023. – С. 225–230.

176. *Осипов, С. П.* Компьютерная томография пенобетона / С. П. Осипов, И. А. Прищепа, А. И. Кудяков [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. – 2018. – № 2(38). – С. 146–152.

177. *Вылегжанин, В. П.* Микропористость ячеистого бетона и ее влияние на теплопроводность / В. П. Вылегжанин, В. А. Пинскер, Т. М. Петрова // *Строительные материалы*. – 2021. – № 8. – С. 67–71.

178. *Yu, W.* Characteristics of Lightweight Cellular Concrete and Effects on Mechanical Properties / W. Yu, X. Liang, F. M.-W. Ni, A. G. Oyey, S. Tighe // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(12). – P. 2678.

179. *Kim, B.-C.* Characterization of ultrasonic properties of concrete / B.-C. Kim, J.-Y. Kim // *Mechanics Research Communications*. – 2009. – Vol. 36, No. 2. – P. 207–214.

180. *Бойчук, А. С.* Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом / А. С. Бойчук, В. Ю. Чертищев, И. А. Диков, А. С. Генералов // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 7 (55). – С. 102–109.

181. *Черепецкая, Е. Б.* Исследование пористости образцов осадочных пород методами ядерного магнитного резонанса и лазерно-ультразвуковой структуроскопии / Е. Б. Черепецкая, Я. О. Залевский // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 8. – С. 63–71.

182. *Ng, K.* Investigation of internal frost damage in cementitious materials with micromechanics analysis, SEM imaging and ultrasonic wave scattering techniques / K. Ng, Y. Sun, Q. Dai, X. Yu // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 50. – P. 478-485.

183. *Lange, D. A.* Image Analysis Techniques for Characterization of Pore Structure of Cement-Based Materials / D. A. Lange, H. M. Jennings, S. P. Shah // *Cement and Concrete Research*. – 1994. – Vol. 24, No. 5. – P. 841–853.

184. *Martin, W. D.* Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement / W. D. Martin, B. J. Putman, N. B. Kaye // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 48. – P. 210-217.

185. *Бедарев, А. А.* Оптимизация и управление процессами структурообразования ячеистого силикатного бетона на основе мультипараметрической модели: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бедарев Анатолий Андреевич. – Воронеж, 2013. – 250 с.

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

187. *Фандеев, В. П.* Методы исследования пористых структур / В. П. Фандеев, К. С. Самохина // *Интернет–журнал Науковедение*. – 2015. – Т. 7, № 4(29). – С. 101.

188. *Матросова, Ю. Н.* Анализ существующих методов контроля параметров, характеризующих поровую структуру материала / Ю. Н. Матросова, Е. В. Клычева // *Контроль. Диагностика*. – 2009. – № 12. – С. 40–44.

189. *Снадин, Е. В.* Использование цифровой фотограмметрии для автоматизации анализа пористых структур / Е. В. Снадин, И. Ю. Лавров, Д. С. Сорокин, А. Е. Капустин // *Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: материалы XVII Международной научно–технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора*

В.И. Калашникова. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2022. – С. 86–90.

190. 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.

191. Сулейманова, Л. А. Фрактальная размерность пористой структуры ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, И. А. Погорелова, М.А. Богачева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 8–15.

192. Сулейманова, Л. А. Фрактальная размерность упаковки пор ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский // Научные технологии и инновации (XXV научные чтения). Сборник докладов Международной научно–практической конференции. –Белгород, 2023. – С. 219–223.

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

194. Сулейманова, Л. А. Особенности анализа локальной пористости в ячеистом бетоне / Л.А. Сулейманова, И. С. Рябчевский // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства. Сборник тезисов докладов VIII международной научно–технической конференции. – Алчевск, 2024. – С. 391–393.

195. Королев, Е. В. Фрактальная размерность как универсальная характеристика параметров структуры и прочности материала / Е. В. Королев, А. Н. Гришина // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 1(42). – С. 5–15.

196. *Федосеев, В. Б.* Оценка фрактальной размерности пористой структуры при перколяции слоя конечной толщины / В. Б. Федосеев // Известия Кабардино–Балкарского государственного университета. – 2022. – Т. 12, № 5. – С. 79–83.

197. *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.

198. *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.

199. *Королев, Е. В.* Анализ структурообразования композитов с использованием фрактальной размерности / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. М. Айзенштадт // Строительные материалы. 2020. № 9. С. 54–61.

200. *Мордасов, М. Д.* Фрактальная размерность и ее связь с физико–механическими свойствами и структурными характеристиками сыпучих материалов / М. Д. Мордасов, Д. М. Мордасов // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 305–310.

201. *Курдюков, В. И.* Анализ методов определения фрактальной размерности / В. И. Курдюков, А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников, Е. Ю. Рогов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 5(69). – С. 46–49.

202. *Андронаке, И. А.* Лакунарность – фрактальный подход к определению пространственной однородности или неоднородности лесов / И. А. Андронаке // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно–практической конференции к 225–летию Герценовского университета. В 2–х томах, Санкт–Петербург, 20–23 апреля 2022 года. – Санкт–Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена. – 2022. – Том I. – С. 70–76.

203. Чекаданов, А. С. Особенности наноструктурного анализа материалов методом малоуглового рентгеновского рассеяния / А. С. Чекаданов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VIII Международной научно-технической конференции: в 2 частях. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2011. – С. 231–238.

204. *ГОСТ 30515–2013. Цементы*. Общие технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 37 с.

205. *ГОСТ 31108–2020. Цементы общестроительные*. Технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

206. *TU 20.60.11–001–58951237–2022. Фибра полипропиленовая*. Технические условия. – Введ. впервые. – М.: ООО ПК «АЛЪЯНС», 2022.

207. *TU 20.60.11–007–062399665–2021. Стекловолоконное фиброволокно, Базальтовое фиброволокно, Полипропиленовое фиброволокно «Титан»*. – Введ. впервые. – М.: ООО «НЗК», 2021.

208. *TU 2272–006–13429727–2007. Волокно строительное микроармирующее*. – Введ. впервые. – М.: ООО «Си Айрлайд», 2007.

209. Wu, D. Enhancing Fatigue Performance of Coal Gangue Concrete (CGC) through Polypropylene Fiber Modification: Experimental Evaluation / D. Wu, L. Jing, Y. Li, T. Ran, S. Peng, W. Jing // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16, No. 8. – Art. 1096.

210. *TU 2482–003–13420175–2006. Пеноконцентрат белковый (протеиновый) для производства пенобетона*.

211. *TU 24.66.47.142–001–0139620869–2019. Комплексная добавка для бетонов и строительных растворов*.

212. *Foam X*. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://biopor.ru/foamx>

213. *ГОСТ 12966–85. Алюминия сульфат технический очищенный*. Технические условия. – Введ. 1987–01–01. – М.: Стандартинформ, 1985. – 16 с.

214. Компания АКВАХИМ. Сульфат Алюминия. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://himrus.ru/katalog/sulfat-alyuminiya>
215. ГОСТ 24211–2018. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.
216. ТУ 20.59.59–129–58042865–2021. Поликарбоксилатный суперпластификатор «Elocrete». – 2021.
217. ТУ 5870-005-58042865-05. Добавка для бетонов и строительных растворов суперпластификатор «Полипласт СП-1». – Введ. впервые. – М.: ОАО «Полипласт», 2005.
218. ГОСТ 23732–2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.
219. Роторно–шаровая мельница «РШМ МИКРОН». Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://nanomol.ru/>
220. ООО «ЭКОСТРОЙМАТЕРИАЛЫ». Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.penostroy.ru/>
221. Методические рекомендации. Применение и изготовление ячеистого фибробетона. – ФАУ «ФЦС», 2018. – 185 с.
222. ГОСТ 310.3–76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.
223. Сулейманова, Л. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660735. Программа расчета состава теплоизоляционного пенобетона / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский, М. А. Богачева. Оpubл. 24.05.2023.
224. ГОСТ 12852.0–2020 Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний (с Поправками). Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 8 с.
225. ГОСТ 27005–2014 Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

226. *ГОСТ 10180–2012 Бетоны.* Методы определения прочности по контрольным образцам. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

227. *ГОСТ 25898–2020 Материалы и изделия строительные.* Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 9 с.

228. *ГОСТ 7076–99 Материалы и изделия строительные.* Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Официальное издание. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 27 с.

229. *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.

230. *Рябчевский, И. С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667396. Программа определения параметров пористости ячеистых бетонов / И. С. Рябчевский, Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. А. Богачева. Оpubл. 24.07.2024.

231. *Рябчевский, И. С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024667454. Программа определения фрактальной размерности пористой структуры ячеистых бетонов / И. С. Рябчевский, Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. А. Богачева. Оpubл. 24.07.2024.

232. *Богачева, М. А.* 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 образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Оpubл. 14.07.2026.

233. 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.

234. Баранова, А. А. Модифицированный теплоизоляционный пенобетон повышенной прочности с применением микрокремнезема: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Баранова Альбина Алексеевна. – Ангарск, 2014. – 145 с.

235. Ma, X. Research on the Improving Performance of Foam Concrete Applied to the Filling of Natural Gas Pipeline Cross-River Tunnel / X. Ma, C. Li, H. Chen, Y. Wei, Y. Weng, S. Li, D. Hojiboev // Materials (Basel). – 2022 – Vol. 15(21). – P. 7461.

236. 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.

237. 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 V III международной научно-технической конференции. – Алчевск: Донбасский государственный технический университет, 2024. – С. 387-390.

238. Богачева М. А. Экспериментальное исследование прочности образцов, армированных полипропиленой 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.

239. 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>.

240. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023660735**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023660735

**«Программа расчета состава теплоизоляционного
пенобетона»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU),
Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь
Сергеевич (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2023618885**

Дата поступления **04 мая 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 мая 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Патент на изобретение № 2848926

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2848926**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ
РАЗМЕРНОСТИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ
ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU),
Погорелова Инна Александровна (RU), Рябчевский Игорь
Сергеевич (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № 2025115543

Приоритет изобретения 05 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 21 октября 2025 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 05 июня 2045 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024667396**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667396

**Программа определения параметров пористости
ячеистых бетонов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна
Александровна (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2024665728**

Дата поступления **09 июля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 июля 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024667454

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667454

**Программа определения фрактальной размерности
пористой структуры ячеистых бетонов**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна
Александровна (RU), Богачева Марина Александровна (RU)*

Заявка № **2024665680**

Дата поступления **09 июля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 июля 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026681399**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026681399

**Программа оценки качества пористой структуры
ячеистых бетонов методом фрактального анализа**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Богачева Марина Александровна (RU), Сулейманова
Людмила Александровна (RU), Погорелова Инна
Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU)*



Заявка № **2026668184**

Дата поступления **03 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **14 июля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

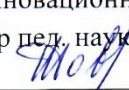
Ю.С. Зубов

Титульный лист стандарта организации
«Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон.
Технические условия»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р пед. наук, профессор

Т.М. Давыденко
«01» 07 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. ректора БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор
С.Н. Глаголев
«01» 07 2025 г.



ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ ПЕНОБЕТОН

Технические условия
СТО 02066339-089-2025

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
канд. техн. наук, доцент
 И.А. Погорелова
«01» 07 2025 г.

Исполнитель:

аспирант
 М.А. Богачева
«01» 07 2025 г.

Белгород 20 25 г.

**Титульный лист рекомендаций по производству теплоизоляционного
дисперсно-армированного пенобетона**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. Г. ШУХОВА**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р тех. наук, профессор

Т.М. Давыденко

«01» 07 2025 г.

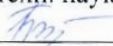
РЕКОМЕНДАЦИИ

по производству теплоизоляционного
дисперсно-армированного пенобетона

РАЗРАБОТАНО

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент

 И.А. Погорелова

«01» 07 2025 г.

Исполнитель:

аспирант

 М.А. Богачева

«01» 07 2025 г.

Белгород 20 25 г.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Общество с ограниченной ответственностью «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»
ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Юр. Адрес: 308013, Белгородская обл., г. Белгород, Михайловское шоссе, дом 5

Почтовый адрес: 308501, Белгородская обл., Белгородский р-н,

п. Дубовое, ул. Заводская, д. 4Д

ИНН 3123319466 КПП 312301001 ОГРН 1133123004618 ОКПО 10410443

р/с 40702810207000005679 БИК 041403633 к/с 30101810100000000633

ОТДЕЛЕНИЕ №8592 СБЕРБАНКА РОССИИ Г.БЕЛГОРОД

т. (4722) 57-57-49; 57-57-61



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Ю.С. Агаркова

25.07.2025

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Богачевой Марины Александровны

на тему: «Теплоизоляционные дисперсно-армированные ячеистые бетоны
неавтоклавного твердения»

Комиссия в составе:

представители ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

начальник цеха Апанасенко А. Н.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. каф. СиГХ, д-р техн. наук, проф. Сулейманова Л.А.,

доц. каф. СиГХ, канд. техн. наук, доц. Погорелова И.А.,

ст. преподаватель, аспирант Богачева М.А.

составили настоящий акт о том, что результаты научной работы использованы при производстве плит размером 1200×600×100 мм из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона марки по средней плотности D200 объемом 2 тыс. м³. При производстве теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона применялись следующие сырьевые компоненты:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цементный завод» [ГОСТ 30515-2013, ГОСТ 31108-2020];

– пенообразователь «Foam X» [ТУ 2483-003-13420170-2015];

– сульфат алюминия [ГОСТ 12966-85];

– суперпластификатор Elocrete [ТУ 20.59.59-129-58042865-2021];

– полипропиленовая фибра [ТУ 20.60.11-002-58951237-2024].

При выпуске опытной партии плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона применена разработанная соискателем система контроля и оценки качества пористой структуры ячеистых бетонов, основанная на определении фрактальной размерности топологии пор теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона методом последовательного изменения разрешения изображения (Патент РФ на изобретение № 2848926 «Способ определения фрактальной размерности пористой

структуры ячеистых бетонов») с последующей корреляцией полученных значений с физико-механическими характеристиками материала.

Выпущенная опытная партия плит из теплоизоляционного дисперсно-армированного пенобетона была использована при устройстве теплоизоляции чердачного перекрытия индивидуального жилого дома по ул. Октябрьская в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области.

Начальник цеха



А.Н. Апанасенко

зав. каф. СиГХ, д-р техн. наук, проф.



Л.А. Сулейманова

доц. каф. СиГХ, канд. техн. наук, доц.



И.А. Погорелова

ст. преподаватель, аспирант



М.А. Богачева

УТВЕРЖДАЮ

БГТУ им. В.Г. Шухова

д-р техн. наук, профессор

И.А. НОВИКОВ

« 05 » 2026 г.



**о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс**

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы Богачевой М.А. «Теплоизоляционный дисперсно-армированный пенобетон неавтоклавного твердения», используются в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 08.03.01, 08.04.01 Строительство, что отражено в рабочих программах дисциплин «Современные материалы и инновационные технологии при реконструкции и технической эксплуатации объектов жилищно-коммунального хозяйства городской инфраструктуры», «Современные технологии в строительстве», «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии при реконструкции и эксплуатации объектов городской застройки».

Заведующий кафедрой
строительства и городского хозяйства,
д-р техн. наук, профессор

[Signature]

Л.А. Сулейманова

Директор
Инженерно-строительного института,
д-р техн. наук, профессор

[Signature]

А.Б. Гольцов