

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

На правах рукописи



МАРУШКО МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ТЕРМОВАКУУМИРОВАННЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН
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 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	12
1.1. Производство ячеистого бетона неавтоклавного твердения и его применение в современном строительстве.....	13
1.2. Способы формирования пористой структуры ячеистого бетона	28
1.3. Давление внешней фазовой среды как фактор управления структурообразованием ячеистого бетона.....	38
1.4. Повышение эффективности ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.....	47
1.5. Выводы	55
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	57
2.1. Характеристика применяемых материалов	57
2.2. Методы исследований	61
2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов.....	61
2.2.2. Методы изучения свойств ячеистобетонных смесей и ячеистого бетона	62
2.2.3. Методы исследования физико-механических характеристик термовакuumированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.....	66
2.3. Выводы	71
3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕРМОВАКУУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ	73
3.1. Фактор избыточного давления – основа формирования пористой структуры	73
3.2. Влияние температурного фактора на формирование ячеистого бетона.....	84

3.3.	Исследование влияния воздухововлекающих добавок на формирование пористой структуры ячеистых бетонов.....	89
3.4.	Агрегатные состояния в модельных ячеистобетонных смесях.....	98
3.5.	Структурообразование и свойства цементного камня.....	108
3.6.	Выводы	113
4.	СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕРМОВАКУУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ	115
4.1.	Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на эксплуатационные свойства ячеистых бетонов неавтоклавного твердения с применением метода математического планирования эксперимента.....	115
4.1.1.	Зависимость средней плотности и прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона на основе золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от исследуемых факторов	115
4.1.2.	Зависимость средней плотности и прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС от исследуемых факторов	125
4.2.	Физико-механические свойства термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения	133
4.3.	Исследование микроструктуры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения	135
4.4.	Пористость термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения и ее определяющие факторы	138
4.5.	Выводы	142
5.	ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОВАКУУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	144
5.1.	Разработка технологической схемы производства изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.....	144

5.2. Технико-экономическое обоснование эффективности производства термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.....	150
5.3. Внедрение и апробация результатов исследования.....	152
5.4. Выводы.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	176
Приложение А. Патент на изобретение № 2750535.....	177
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680208.....	178
Приложение В. Титульный лист стандарта организации СТО 02066339-049-2022 «Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения. Технические условия».....	179
Приложение Г. Титульный лист рекомендаций по производству термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.....	180
Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ».....	181
Приложение Е. Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	182

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. На сегодняшний день развитие строительного материаловедения направлено на повышение качества, надежности, экологичности и снижение себестоимости материалов и изделий. Одним из приоритетных направлений является производство неавтоклавного энергоэффективного ячеистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками, потребность в котором возрастает в связи с постоянным развитием строительного комплекса, в том числе увеличением объемов возводимого индивидуального жилищного строительства.

Важными и актуальными вопросами производства неавтоклавного ячеистого бетона, в котором в качестве заполнителя используется вторичный продукт промышленности – зола-уноса ГРЭС, являются способы создания качественной пористой структуры, повышение прочности и морозостойкости, снижения средней плотности, теплопроводности и водопоглощения. Производство неавтоклавного ячеистого бетона с требуемыми физико-механическими характеристиками позволяет повысить технико-экономические показатели и использовать отходы промышленности, улучшая экологию окружающей среды, а также энергоэффективность зданий, снизив затраты на отопление и кондиционирование.

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; с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы. В отечественной и зарубежной литературе достаточно подробно освещены аспекты и возможные способы повышения качества неавтоклавного ячеистого бетона. Исследования затрагивают вопросы совершенствования приемов, изменений условий и режимов формирования пористой структуры ячеистого бетона и технологии изготовления изделий на его основе, а также влияния рецептурных и технологических факторов изготовления

ячеистого бетона. Мало изученными, но актуальными являются: использование отходов промышленности вместо дорогостоящего кварцевого песка; использование воздухововлекающих добавок в качестве порообразователей; применение температурного фактора, как важной составляющей вакуумированной технологии для изготовления неавтоклавного ячеистого бетона, и внедрения термовакуумирования для управления процессами вспучивания поризованной смеси с получением улучшенной поровой структуры и свойств ячеистых бетонов.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение ячеистого бетона неавтоклавного твердения с улучшенными физико-механическими характеристиками за счет термовакуумирования смеси в процессе формирования пористой структуры материала.

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

- изучение влияния вакуумирования как способа создания ячеистой структуры бетона на начальном этапе его твердения при термовакуумировании поризованной смеси;
- разработка принципов управления процессами вспучивания поризованных смесей термовакуумированием для получения улучшенной поровой структуры ячеистого бетона;
- исследование объемного содержания фаз (твердой, жидкой и газообразной) в процессах, протекающих в ячеистобетонной смеси при формировании структуры;
- разработка составов термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с учетом рецептурно-технологических факторов и изучение их физико-механических характеристик;
- подготовка нормативной документации на производство и применение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения; апробация

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

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавногo твердения с однородной пористой структурой и улучшенными физико-механическими характеристиками за счет совместного применения температурного фактора и вакуумирования для управления кинетикой газовыделения и гидратации на стадии формирования структуры. Установлено, что величина вакуума 0,085–0,095 МПа создает условия для контролируемого роста газовых пузырьков, а рациональный температурный режим 39–43 °С обеспечивает необходимую скорость гидратации по закону Аррениуса.

Установлен характер влияния величины вакуума на процесс структурообразования ячеистого бетона, заключающийся в следующем. Изменение величины вакуума в диапазоне 0,055–0,095 МПа обеспечивает переход от кинетически затрудненного газовыделения к равномерному росту сферических пор. При этом величина вакуума >0,095 МПа приводит к коалесценции пор и критической усадке материала, тогда как величина вакуума менее 0,055 МПа не позволяет преодолеть энергетический барьер для стабильного порообразования.

Разработаны принципы управления фазовым составом ячеистобетонной смеси с использованием диаграммы агрегатных состояний, описывающей последовательность стадий структурообразования. На основе закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем формализован процесс перехода от начального состояния системы через стадии воздухововлечения, термовакuumирования, гидратации цемента и твердения изделия, что позволяет количественно описывать изменение объемных концентраций фаз на каждом технологическом этапе.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах формирования пористой структуры

неавтоклавного ячеистого бетона при комплексном воздействии температуры и вакуума.

Развиты модельные представления о динамике расширения газовых пор в вязкоупругой среде на основе уравнения Рэлея-Плессета, адаптированного для ячеистобетонной смеси, и законов постоянства объемного фазового состава дисперсных систем.

Разработаны рациональные составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с использованием промышленных отходов (золы-уноса), обеспечивающие получение изделий марок по средней плотности $D400$ – $D600$ с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) характеристиками.

Предложена технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, особенностью которой является вакуумирование предварительно нагретой смеси.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой данной работы служили результаты как фундаментальных, так и прикладных работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных разработке технологий производства ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. Экспериментальные исследования охватывали изучение структуры и свойств ячеистых бетонов с использованием методов рентгеновской дифрактометрии, растровой электронной микроскопии, а также комплекса стандартизированных испытаний образцов. Все эксперименты проводились на высокотехнологичном сертифицированном оборудовании, что обеспечило необходимую точность и статистическую обоснованность полученных данных.

Положения, выносимые на защиту:

– научно-теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с

однородной пористой структурой и с улучшенными физико-механическими характеристиками;

– влияние вакуумирования и температуры как факторов формирования пористой структуры ячеистого бетона на начальном этапе его твердения;

– принципы управления процессами вспучивания поризованных смесей за счет термовакуумирования;

– изменения фазового состава твердеющей ячеистобетонной смеси в процессе поризации с учетом воздухововлечения и термовакуумирования смеси;

– закономерности влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики неавтоклавного ячеистого бетона и изделий повышенной эффективности на его основе;

– технологическое решение производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с оценкой его технико-экономической эффективности. Результаты апробации.

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

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II-IV, VII, IX Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2018-2020, 2023, 2025), XII Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2020), I Международной научно-практической конференции: «Архитектура.

Строительство. Информационные технологии – 2023» (Новороссийск, 2023), IX Международном студенческом строительном форуме (Белгород, 2024), VIII Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (Алчевск, 2024).

Внедрение результатов исследования. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород), где была выпущена партия блоков из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Результаты исследований апробированы в производственных условиях при строительстве индивидуального жилого дома в г. Старый Оскол Белгородской области. Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-049-2022 «Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения. Технические условия» и Рекомендации по производству термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

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: 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 работы в издании, индексируемом в базах данных Scopus. Получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство 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 термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, основанные на созданных рецептурных и технологических решениях, выполнена 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 182 страницах машинописного текста, включающего 23 таблицы, 66 рисунков, список литературы из 175 источников, 6 приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Актуальность использования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения определяется стратегическим курсом на повышение энергетической эффективности и снижение углеродной нагрузки строительной отрасли. В рамках реализации государственной энергетической политики Российской Федерации ключевыми направлениями развития экономики обозначены рациональное использование топливно-энергетических ресурсов и внедрение энергоэффективных технологий [1–4]. Согласно положениям действующей федеральной и международной нормативно-правовой базы, приоритетным становится переход к новым поколениям строительных материалов, обеспечивающих снижение тепловых потерь, повышение эксплуатационной надежности и долговечности зданий при одновременном уменьшении затрат на производство и эксплуатацию [5–9].

Применение технологий неавтоклавного твердения способствует сокращению энергетических издержек на этапе производства и обеспечивает высокую эффективность формирования пористой структуры материала. Такой подход отвечает современным требованиям к энергетической эффективности зданий и сооружений, закрепленным в нормативных документах [10–14], позволяя сочетать низкую теплопроводность и достаточную прочность при минимальном воздействии на окружающую среду. Использование подобных технологий дает возможность отказаться от энергоемких процессов парового автоклавирования, что особенно актуально в условиях реализации программ по энергосбережению и повышению эффективности ресурсопользования.

В совокупности эти факторы характеризуют термовакуумированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения как перспективное направление в области создания инновационных строительных материалов. Его применение способствует достижению стратегических целей государственной энергетической политики, указанных в долгосрочных планах развития энергетики Российской

Федерации, и соответствует международным тенденциям устойчивого развития, отмеченным в аналитических обзорах мирового энергетического рынка [15–17].

1.1. Производство ячеистого бетона неавтоклавного твердения и его применение в современном строительстве

В настоящее время строительная отрасль находится на этапе активного технологического обновления, что связано с возрастающими требованиями к энергоэффективности, экологической безопасности и устойчивому развитию. На фоне реализации государственной энергетической стратегии и программ по энергосбережению в России особое внимание уделяется созданию инновационных строительных материалов, способных обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики при снижении энергозатрат на их производство и использование [18–21].

Таким образом, изучение и совершенствование технологии производства ячеистых бетонов неавтоклавного твердения представляет собой комплексную научно-практическую задачу, охватывающую вопросы оптимизации сырьевого состава, совершенствования методов структурообразования, управления кинетикой процессов твердения и повышения эксплуатационных характеристик готовых изделий. Данная задача напрямую коррелирует со стратегическими направлениями государственной политики Российской Федерации в области энергосбережения, рационального использования минерально-сырьевых ресурсов и комплексной модернизации строительной индустрии [22–25].

Ячеистый бетон является искусственным пористым эффективным строительным материалом, состоящим из затвердевшей смеси минерального вяжущего, кремнеземистого компонента и равномерно распределенных пор в виде ячеек, образованных газо- или пенообразователем, являющимся одним из разновидностей легкого бетона. В соответствии со стандартом [26], ячеистый бетон классифицируется по признакам, приведенным на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Классификация ячеистого бетона

Для ячеистого бетона определяют следующие физико-механические характеристики: среднюю плотность, прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, морозостойкость, теплопроводность, отпускную влажность,

сорбционную влажность, паропроницаемость и усадку при высыхании [26]. Показатели по основным характеристикам представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Физико-механические характеристики ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Технология изготовления ячеистого бетона неавтоклавного твердения является менее затратной, так как производство организуется на небольших технологических линиях, с применением минимального количества оборудования, а твердение ячеистобетонного массива происходит в естественных условиях при повышенной влажности воздуха. Таким образом, производство неавтоклавного ячеистого бетона можно организовать в короткие сроки и даже на стандартных производственных мощностях заводов-изготовителей ячеистобетонных изделий [27–29].

Переходя от технологических аспектов к экономическим и экологическим параметрам функционирования строительной отрасли, необходимо подчеркнуть, что применение неавтоклавных технологий в производстве ячеистых бетонов имеет комплексные преимущества, обусловленные снижением энергоемкости и экологической нагрузки. Отказ от высокотемпературных и высоконапорных стадий твердения позволяет существенно сократить энергопотребление, уменьшить углеродный след и снизить совокупные операционные издержки производства. В этой связи использование минеральных добавок, таких как зола-уноса и микрокремнезем, способствует не только частичной замене портландцемента [30–32], но и улучшению реологических свойств сырьевой смеси.

Традиционно, основными сырьевыми компонентами для производства ячеистых бетонов являются вяжущие различных типов и классов, кремнеземистые компоненты (песок, зола-уноса, продукты обогащения руд), порообразователи (пено- и газообразователи, воздухововлекающие добавки), регуляторы структурообразования, нарастания пластической прочности, ускорители твердения, пластифицирующие добавки и вода.

Для фиксирования структуры высокопрочного ячеистобетонного массива и предотвращения его разрушения целесообразно применение быстротвердеющих и особо быстротвердеющих специальных цементов. Возможно применение в технологии ячеистого бетона цементов с гидравлическими добавками зол-уноса, доменного гранулированного шлака (около 10–15 %), отличающимися вяжущими свойствами и активацией твердения. Актуально использование для производства ячеистого бетона тонкомолотых многокомпонентных цементов с повышенной дисперсностью и оптимизированной гранулометрией, тонкий помол которых способствует практически полной единовременной гидратации минералов клинкера.

Для регулирования свойств ячеистых бетонов вводят, кроме гипер- и суперпластификаторов, и другие современные добавки и активные минеральные компоненты, позволяющие регулировать сроки схватывания, воздухововлечение

при перемещении и уплотнении смеси, собственные деформации цемента и бетона при твердении, плотность и прочность бетона и значительно улучшать и другие свойства в зависимости от его назначения. Это позволяет в достаточно широком диапазоне варьировать свойства смеси для получения энергоэффективных и высококачественных ячеистых бетонов [32].

Одновременно данные добавки выполняют экологическую функцию, обеспечивая утилизацию промышленных отходов и снижение объемов захоронения техногенных материалов [33–37].

Потенциал неавтоклавной технологии усиливается возможностью локализации производства в непосредственной близости от строительных площадок, что минимизирует транспортные издержки и способствует сокращению выбросов от логистических операций. Модульный характер производственных мощностей и низкий уровень капитальных затрат создают благоприятные условия для гибкого наращивания объемов выпуска в соответствии с конъюнктурой рынка.

Динамика мирового рынка ячеистого бетона подтверждает устойчивый рост интереса к энергоэффективным материалам. По данным аналитических прогнозов, совокупный объем рынка в 2023 г. составил 25,4 млрд долл., при этом среднегодовые темпы роста оцениваются более чем в 4,8 % в период до 2032 г. Несмотря на то, что наибольший вклад в выручку сохраняет автоклавный сегмент, неавтоклавные технологии демонстрируют нарастающую рыночную значимость, обеспечивая расширение регионального предложения и удовлетворяя потребности жилищного строительства в динамично развивающихся территориях [38].

С региональной точки зрения, лидерство остается за Азиатско-Тихоокеанским регионом, где масштабные государственные программы жилищного строительства служат драйвером производства энергоэффективных материалов. Европейский рынок демонстрирует стабильный рост под воздействием строгих энергетических регламентов и программ модернизации старого жилого фонда, а североамериканский сектор укрепляется благодаря

инициативам по реновации и строительству энергооптимизированных объектов. Эта географическая диверсификация демонстрирует глобальную направленность строительной индустрии на повышение энергоэффективности зданий и снижение удельного энергопотребления. В соответствии с прогнозами, представленными на рисунке 1.3, ожидается сохранение положительного тренда роста мирового рынка ячеистого бетона при среднегодовом темпе увеличения до 5,7 % [38].

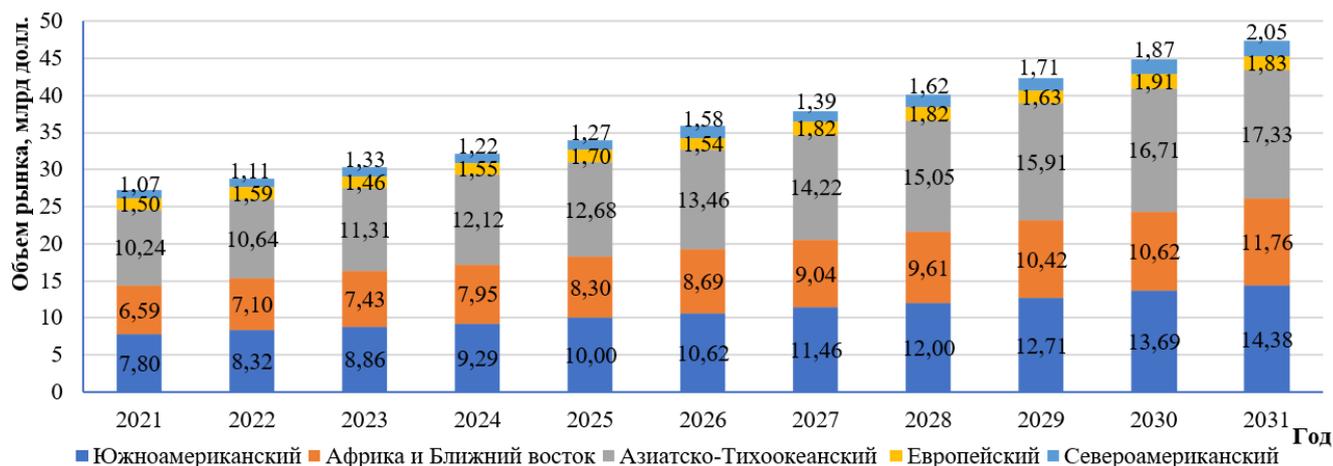


Рисунок 1.3 – Мировое производство ячеистого бетона по регионам в период с 2021 по 2031 гг.

По технологической классификации автоклавная технология по-прежнему формирует основу мирового производства благодаря высокой точности геометрических параметров изделий и стабильности качества. Однако неавтоклавные решения становятся все более востребованными в силу своей адаптивности, сниженной капиталоемкости и возможности быстрого ввода производственных линий. Таким образом, формируется сбалансированная структура отрасли, где автоклавные технологии преобладают в стандартизированных промышленных цепочках поставок, а неавтоклавные – в сегментах локальных и ускоренных проектов.

Большое внимание, уделяемое ячеистым бетонам, обуславливается высокой технико-экономической эффективностью их производства и применения в разных видах строительства, особенно жилищном, призванном обеспечить граждан России доступным и комфортным жильем. По степени обеспеченности жильем Россия в 1,5–2 и более раз отстает от средневропейского уровня (35–40 м²/чел), не говоря о лидерах по этому показателю: Норвегия (74 м²/чел), США (65 м²/чел),

Германия, Великобритания (44–45 м²/чел). Чтобы выйти на европейский уровень, имеющийся жилой фонд (3,6 млрд. м²), необходимо увеличить в 1,6–2 раза. Ежегодный ввод жилья при этом должен составлять не менее 1 м² на душу населения, при котором европейский уровень обеспеченности жильем может быть достигнут в Российской Федерации к 2025 г. [39].

Среднесрочные прогнозы указывают на сохранение восходящего тренда совокупного рынка ячеистого бетона с прогнозируемыми темпами роста в диапазоне 4,8–6 % до начала 2030-х гг. При этом наиболее вероятным сценарием является стабильно-положительная динамика, поддерживаемая государственными программами энергосбережения и нормативами по тепловой защите зданий [38].

Для промышленных производителей и инвесторов приоритетными остаются направления локализации производства в урбанистически активных кластерах Азии и странах Европы, где наблюдаются наиболее строгие требования к энергоэффективности. Среди перспективных направлений развития отрасли выделяются совершенствование геометрической точности изделий, развитие крупноформатных панельных решений и формирование сервисных моделей «поставка + монтаж» [38].

Анализ состояния отечественного рынка демонстрирует аналогичные тенденции: российский сектор ячеистых бетонов сохраняет устойчивый рост, отражая мировую траекторию развития. После корректировки в 2022 г. объем производства газобетона стабилизировался на уровне около 14 млн м³, с прогнозируемым увеличением до 15–16 млн м³ в среднесрочной перспективе. Рост стимулируется реализацией программ индивидуального жилищного строительства и государственной реновации, при этом доля газобетона превысила 50 % рынка стеновых материалов [40].

На рисунке 1.4 отображается географическая концентрация производственных мощностей по изготовлению неавтоклавного ячеистого бетона в России. Значительная часть предприятий локализована в Уральском и Сибирском федеральных округах, включая такие города, как Екатеринбург, Тюмень, Челябинск, Новосибирск, Абакан, Новокузнецк и Новоалтайск.

Размещение производственных мощностей в данных регионах обусловлено наличием обширной сырьевой базы золы-уноса от угольных теплоэлектростанций и промышленных предприятий. Зола-уноса используется в объеме до 70 % от массы кремнеземистого компонента в составе неавтоклавного ячеистого бетона, что позволяет существенно снизить себестоимость производства и одновременно решать экологические задачи по утилизации промышленных отходов [41].

Технологическая специализация предприятий варьируется от мелкосерийного производства ячеистого бетона с объемами 10–30 тыс. м³/год до крупных автоматизированных комплексов с выпуском свыше 100 тыс. м³/год. Предприятия Уральского региона специализируются на газозолобетоне с применением золы-уноса от местных государственных районных электрических станций (ГРЭС) и других источников техногенного сырья. Производственные мощности в Сибири ориентированы на комбинированное использование золы-уноса от местных ГРЭС [42, 43] и традиционных песчаных наполнителей, что обеспечивает гибкость рецептур и адаптацию к региональным требованиям строительного рынка.

Таким образом, производство неавтоклавного ячеистого бетона способствует комплексному решению задач строительной отрасли и экологии через снижение объемов и площадей техногенных отходов промышленности, при этом формируя устойчивую сырьевую базу для выпуска современных энергоэффективных стеновых материалов в регионах с развитой угольной энергетикой.

Российские рыночные цены прошли период высокой волатильности: после стабильности до 2021 г. резкий рост издержек в 2022 г. привел к кратковременному удвоению цен с последующей стабилизацией на более высоком уровне. Региональный разброс цен сохраняется из-за различий в стоимости энергии и логистике. Импорт и экспорт изделий занимают незначительную долю, что делает рынок сильно локализованным [44].

Спрос поддерживается льготными ипотечными программами, ужесточением норм по энергоэффективности и дефицитом квалифицированной рабочей силы.

Ограничителями выступают капиталоемкость автоклавных линий и региональные дисбалансы мощностей. Базовый сценарий на ближайшие годы предполагает умеренно-позитивный рост и дальнейшую консолидацию активов вокруг крупных региональных производителей [45].

Реализация национальных проектов и расширение льготного ипотечного кредитования продолжают стимулировать спрос на жилье. В 2023 г. был достигнут рекордный ввод жилья в 110,4 млн м², что на 7,5 % превысило показатель 2022 г. [46].

В 2024 г. ввод жилья несколько сократился до 107,8 млн м², однако объемы остаются на высоком уровне. По оценкам, к концу 2025 г. ввод жилья превысит 100 млн м², а в 2026 г. составит порядка 100–105 млн м².

Несмотря на некоторую коррекцию в 2024 г., среднегодовые темпы ввода жилья за период 2020–2025 гг. сохраняются в диапазоне 5–8 %, что свидетельствует о стабильно высоком спросе в строительной отрасли [47–49].

Динамика ввода жилья в эксплуатацию представлена на рисунке 1.5.

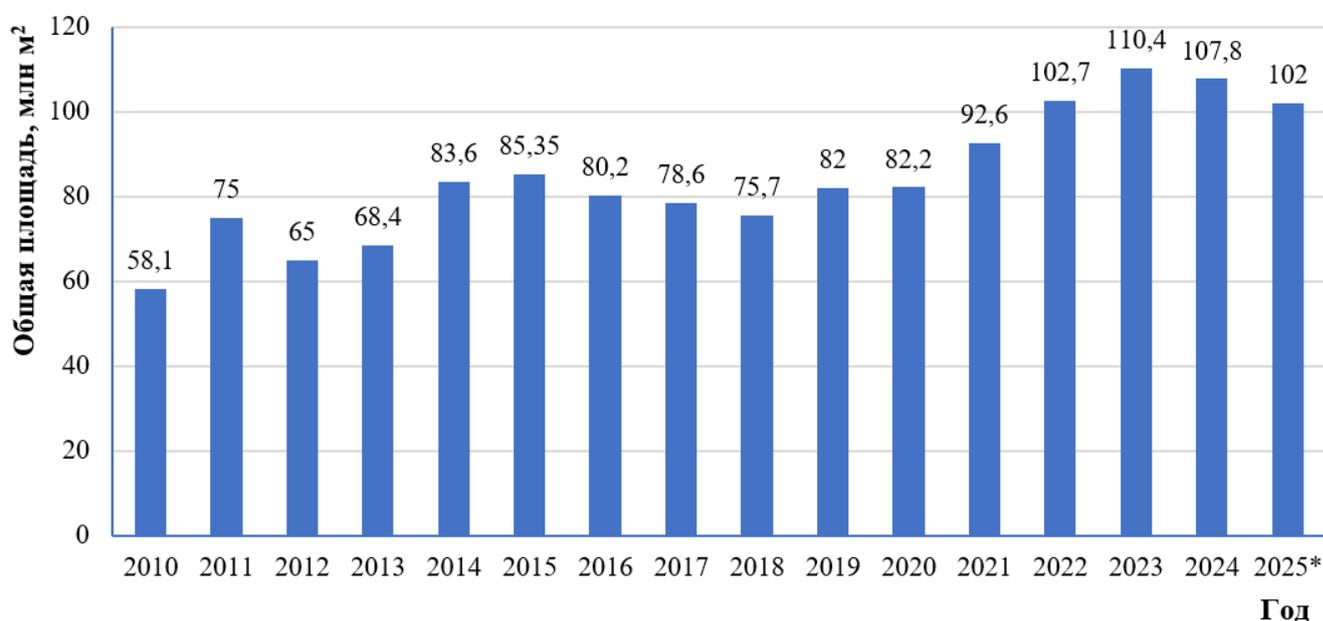


Рисунок 1.5 – Динамика ввода жилья в России за период 2010–2025 гг.
(2025* – прогноз Минстроя РФ)

Преобладающим стеновым материалом в индивидуальном домостроении остаются ячеистобетонные блоки: по данным на сентябрь 2024 г., их доля составляла 35,4 % всех используемых материалов наружных стен, за ними

следовали деревянные каркасные конструкции (21,2 %) и керамзитобетонные блоки (8,9 %). В условиях продолжающегося ужесточения требований по сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций востребованность газобетонных блоков сохраняется и в 2025 г.: растущие стандарты энергоэффективности делают этот материал одной из ключевых составляющих рынка малоэтажного строительства, а доля газобетонного блока в индивидуальном строительстве прогнозируется на уровне 36–37 % в 2025 г. и около 38 % в 2026 г. [50]. Материалы ограждающих конструкций, используемые при строительстве индивидуальных жилых домов в России приведены на рисунке 1.6.

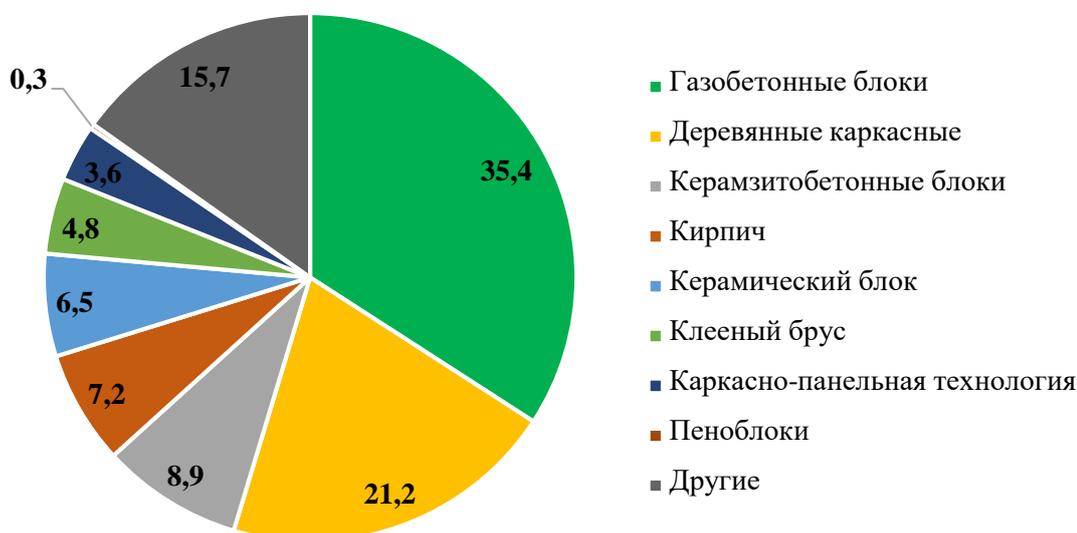


Рисунок 1.6 – Материалы ограждающих конструкций стен, используемые при индивидуальном жилищном строительстве, в целом по России в 2024 г.

Возросшие инвестиционные возможности, как отдельных коммерческих фирм (предприятий), так и самого населения, привели к повышению спроса на эффективные стеновые материалы. Увеличению спроса способствует и повышение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, что вызвало необходимость использования новых эффективных стеновых материалов. Развитие получило производство легких бетонов, особенно ячеистых, для изготовления ограждающих конструкций зданий повышенного уровня теплозащиты в виде блоков (ячеистобетонных камней), монолитных перекрытий и покрытий малоэтажных зданий, теплоизоляции чердачных

перекрытий и полов первых этажей, звукоизоляции перекрытий, стен и перегородок и монолитного бетонирования [51, 52].

Ячеистый бетон неавтоклавного твердения получили широкое применение в различных областях современного строительства, что обусловлено специфическими особенностями его пористой структуры и, следовательно, многообразием функциональных назначений. Данный материал представляет собой композит, сочетающий в себе высокие прочностные и теплоизоляционные свойства, что оказывает существенное влияние на энергосбережение и, как следствие, повышает технико-экономические показатели, потребительские качества и комфортабельность гражданских зданий. Ячеистый бетон и производимые изделия на его основе широко используются в строительстве (рисунок 1.7).

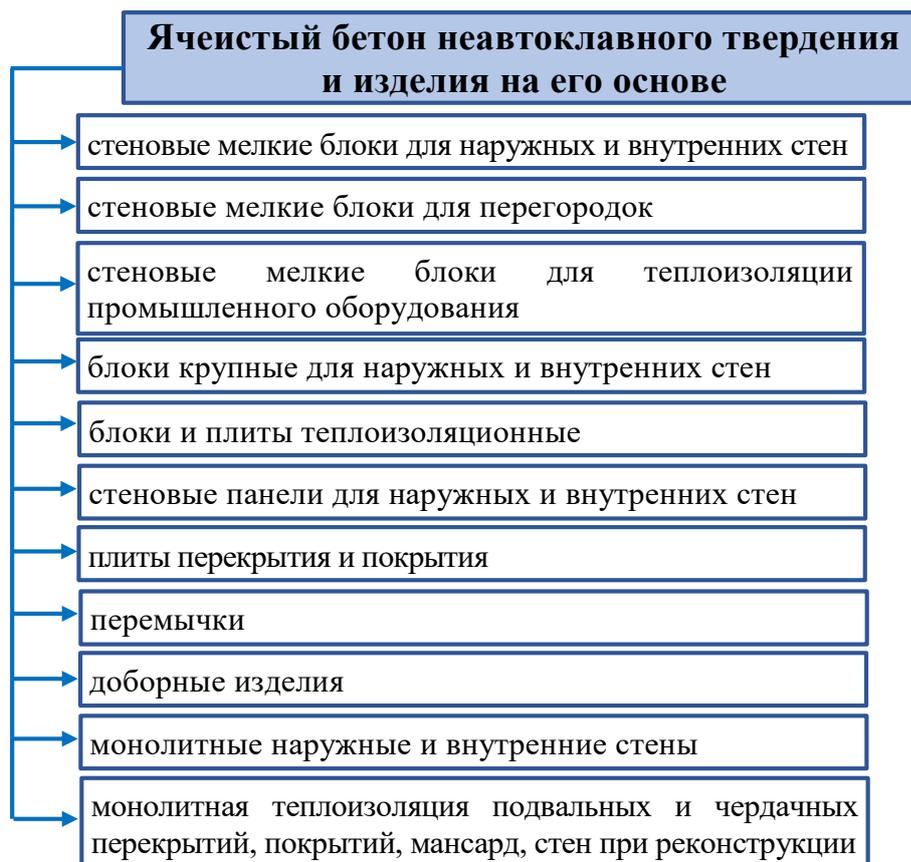


Рисунок 1.7 – Ячеистый бетон неавтоклавного твердения и изделия на его основе

Сфера применения ячеистого бетона неавтоклавного твердения охватывает малоэтажное строительство, возведение монолитно-каркасных многоэтажных

жилых домов, а также капитальный ремонт и реконструкцию гражданских зданий [53, 54]. В малоэтажном строительстве данный материал используется для возведения несущих конструкций стен (рисунок 1.8) и перегородок в виде крупноформатных блоков и стеновых панелей, а также для устройства монолитных перекрытий и покрытий, заливаемых на месте и твердеющих в естественных условиях. При выполнении монолитных работ возможно применение несъемной опалубки из специальных пазогребневых плит и блоков.



Рисунок 1.8 – Возведение индивидуального жилого дома со стенами из ячеистобетонных блоков

В многоэтажном каркасном строительстве ячеистобетонные блоки широко применяются для возведения самонесущих ограждающих конструкций стен и перегородок [55]. Наряду с монолитными железобетонными конструкциями, крупноформатные ячеистобетонные блоки обеспечивают высокую геометрическую точность вертикальных конструкций здания и способствуют увеличению скорости его возведения (рисунок 1.9).

В контексте современной государственной политики, направленной на повышение эффективности, устранение морального износа и продление срока службы эксплуатируемых гражданских зданий, ячеистый бетон находит применение при проведении строительно-монтажных работ по реконструкции и модернизации. Его совместимость с другими строительными системами имеет особое значение при реконструкции [55].



Рисунок 1.9 – Возведение монолитно-каркасного жилого дома с кладкой ограждающих стен из ячеистобетонных блоков

Положительные качества, способствующие широкому использованию ячеистого бетона при реконструкции зданий, включают:

- малый собственный вес изделий, что, как правило, не требует усиления существующих несущих конструкций;
- легкость транспортировки и ускорение монтажных работ;
- высокая обрабатываемость, позволяющая решать сложные задачи при нестандартной геометрии планов и поверхностей;
- низкие затраты при последующих работах (прорезание проемов, сверление, облицовка);
- ровные и гладкие поверхности, не требующие оштукатуривания и допускающие только шпатлевание.

При любой реконструкции практически неизбежны изменения в существующих строительных конструкциях, такие как закладка или прорезание новых оконных и дверных проемов, удаление или встраивание несущих и ограждающих стен. Для таких работ ячеистобетонные изделия предпочтительны по следующим причинам:

- наличие нормированных классов по средней плотности и прочности, что позволяет применять материал с заданными эксплуатационными свойствами;

– при сопоставимой прочности, ячеистый бетон обладает значительно меньшим весом и, соответственно, меньшей теплопроводностью по сравнению с примыкающей кирпичной кладкой, что улучшает теплоизоляцию в зонах теплопроводных включений;

– легкость обработки изделий пилой, фрезой, рубанком или дрелью, обеспечивающая точное примыкание к существующим строительным элементам.

Надстройка зданий представляет собой комплекс мероприятий, включающих как новое строительство, так и реконструкцию. С одной стороны, устраняются изношенные элементы существующего здания, например, кровля, а с другой – возводятся новые помещения. Существенным ограничением при возведении надстройки является несущая способность конструкций здания, включая несущие стены и фундаменты [56, 57]. Собственный вес и временные нагрузки от надстройки должны восприниматься существующими конструкциями, в противном случае требуется их усиление. Благодаря относительно малому весу изделий из ячеистого бетона, вопросы усиления несущих конструкций, как правило, не возникают (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Схема надстройки полноценного этажа при реконструкции гражданского здания с кладкой ограждающих стен из ячеистобетонных блоков

Анализ российского строительного рынка показывает, что монолитный ячеистый бетон, а также изделия и конструкции на его основе, в последние годы являются одними из самых востребованных строительных продуктов. Это свидетельствует о его надежных и высоких эксплуатационных и физико-механических характеристиках. При этом ячеистобетонные изделия неавтоклавного твердения имеют большие перспективы применения благодаря своим экологическим свойствам и экономическим показателям производства по сравнению с автоклавными аналогами [58]. В жилищном строительстве спрос на энергоэффективные, ресурсосберегающие, экологичные и экономически выгодные строительные материалы, каким и является ячеистый бетон, ежегодно растет и будет продолжать увеличиваться в последующие годы.

1.2. Способы формирования пористой структуры ячеистого бетона

Ключевым этапом в технологии производства ячеистого бетона является стадия формирования пористой структуры – поризации, в результате которой возникает ячеистая структура бетона. При этом важными факторами становятся качество и целостность образующейся структуры, определяющие физико-механические характеристики и эксплуатационные показатели изделий из ячеистого бетона.

На сегодняшний день существуют различные способы порообразования ячеистого бетона, представленные на рисунке 1.11.

Одним из широко применяемых методов формирования пористой структуры в ячеистых бетонах является метод газообразования, заключающийся во введении в состав формовочной смеси специальных газообразующих веществ (например, алюминиевой пасты или пудры, кремнеалюминиевого сплава, перекиси водорода и других добавок), которые при химическом взаимодействии с компонентами цемента или между собой выделяют газы. Эти газы равномерно распределяются по объему вязкой смеси, вызывая ее поризацию и образование ячеистой структуры. По окончании стадии активного выделения газа и вспучивания

формовочной массы наступает этап схватывания и загустевания, благодаря которому формируется и стабилизируется полученная пористая структура.

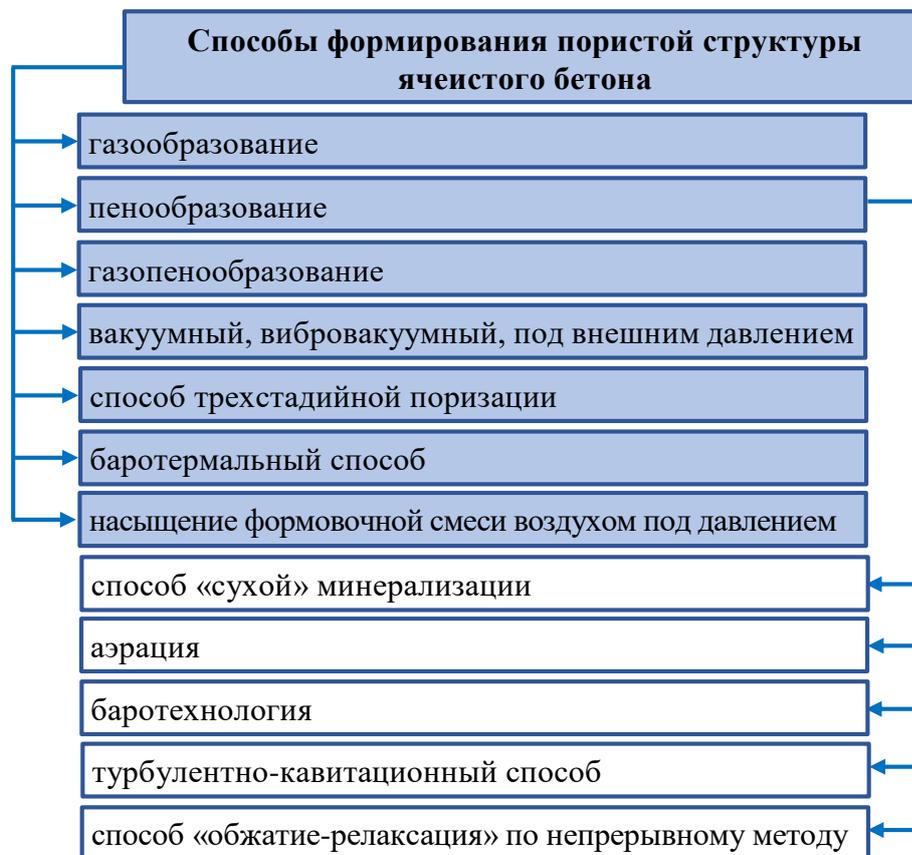


Рисунок 1.11 – Способы формирования пористой структуры ячеистого бетона

Способ пенообразования в производстве ячеистого бетона представляет собой широкую и развитую область, включающую несколько технологических решений, каждое из которых направлено на эффективное формирование пористой структуры материала. В классическом варианте этот способ предусматривает раздельное приготовление двух ключевых компонентов: сначала создается стабильная пена, а затем отдельно – раствор вяжущего вещества, например, цемента. После этого осуществляется тщательное совместное перемешивание этих компонентов, что обеспечивает однородное распределение воздушных пузырьков в смеси и, как следствие, формирование пористой структуры. Особое преимущество использования пены вместо традиционного образователя пор, такого как алюминиевая пудра, заключается в повышенной технологичности процесса. Пенообразователи, как правило, безопасны в обращении, обладают

меньшими затратами на приобретение, не требуют строгого порядка введения в смесь и сложного соблюдения рецептурно-технологических параметров.

Метод «сухой» минерализации представляет собой инновационный подход к аэрации смеси. В его основе лежит смешение низкократной пены с сухими компонентами, что приводит к «бронированию» воздушных пузырьков – закреплению их структуры за счет покрытия твердыми частицами. При этом происходит закупорка каналов Плато, которые обычно образуются между пузырьками, твердыми частицами, что препятствует слиянию пузырьков и способствует повышенной стабильности пены. Одновременно сухое вяжущее сорбирует свободную воду, что регулирует влажностные характеристики смеси и улучшает ее пластичность. Технология аэрации в этом случае обеспечивает вспенивание цементно-песчаного раствора с пенообразователем без необходимости предварительной подготовки компонентов, что упрощает и ускоряет производственный процесс [59–62].

Аналогично, способ аэрации предусматривает создание вспененного цементно-песчаного раствора путем введения порообразователя непосредственно в смесь без предварительного его приготовления. Такой способ позволяет упростить технологическую цепочку и добиться равномерного распределения пузырьков воздуха внутри массы [63–65].

Баротехнология, применяемая при приготовлении пенобетонной смеси, кардинально отличается от описанных методов, поскольку включает процессы смешивания и транспортирования при избыточном давлении. В этом случае пенобетонная смесь формируется в герметичном смесителе под контролируемым повышенным давлением, что позволяет повысить однородность и плотность структуры. Раствор и пенообразователь подаются в смеситель через пеногенератор, после чего происходит одновременное введение сухих минеральных компонентов. Такой подход обеспечивает эффективное смешивание

и стабилизацию пены в смеси, поддерживая оптимальные условия для формирования равномерной пористой структуры ячеистого бетона [66, 67].

Турбулентно-кавитационный метод подготовки и структурирования пенобетонной смеси представляет собой технологический процесс, в котором перемешивание компонентов осуществляется с использованием специализированного пенобетоносмесителя, оснащенного активными рабочими органами – лопастями с насадками кавитационного типа. При высокоскоростном вращении этих элементов формируются локальные зоны турбулентности, сопровождающиеся появлением кавитационных каверн – микрополостей, где давление жидкости падает на 15–20 % ниже уровня атмосферного. Такое снижение давления инициирует процесс самопроизвольного захвата воздуха в структуру дисперсной системы. В результате воздух равномерно вовлекается в объем смеси, формируя сеть микропузырьков, распределенных по всему объему раствора. Эти пузырьки стабилизируются действием пенообразователя, образующего поверхностно-активную пленку, препятствующую их слиянию. Затем пузырьки фиксируются в структуре материала частицами вяжущего вещества – цементом и минеральным наполнителем, в частности кварцевым песком. Такая организация внутренней структуры смеси обеспечивает не только равномерность поризации, но и повышение прочностных и теплоизоляционных характеристик пенобетона за счет более однородного распределения пор и стабильности их размеров [68–71].

Метод «обжатие–релаксация», применяемый в технологии приготовления пенобетонных смесей по непрерывной схеме, базируется на принципе циклического изменения давления в системе с целью формирования и стабилизации оптимальной структуры порового пространства. На начальной стадии процесса осуществляется получение высокократной (мелкопористой и устойчивой) пены, которая далее вводится в цементно-песчаный раствор в условиях повышенного давления внутри поризатора. При воздействии давления

пенобетонная масса подвергается «обжатию», то есть уплотнению и выравниванию распределения воздуха по объему смеси. После этого происходит плавное снижение внешнего давления – стадия «релаксации», в ходе которой пенобетонная смесь возвращается к исходному объему. Этот процесс сопровождается выравниванием внутреннего и внешнего давления до атмосферного уровня, что позволяет стабилизировать поровую структуру материала без разрушения пенообразных пленок. Применение метода в непрерывном производственном цикле обеспечивается использованием компактных поризаторов гидронагнетательного типа, которые совмещают внутри одной установки несколько технологических операций: приготовление пенобетонной массы под давлением («обжатие»), поддержание однородности структуры в условиях изменения давления («релаксация») и транспортировку готовой смеси по гибким шлангам непосредственно к месту укладки. Такая организация технологического процесса способствует снижению потерь по объему, увеличению степени равномерности распределения пор и, как следствие, повышению эксплуатационных характеристик готового пенобетона (прочности на сжатие, стабильности размеров, морозостойкости) [72–75].

Способ газопенообразования, который сочетает в себе достоинства материалов с использованием газообразователей и пенообразующих компонентов, реализуется посредством двух последовательных этапов. На первом этапе путем активного внедрения воздуха в смесь образуются мельчайшие воздушные поры, представляющие собой равномерно распределенные газовые включения малых размеров. Затем происходит процесс расширения этих пор вследствие химического газовыделения из газообразователей, что приводит к формированию более крупных газовых пор. Такой двухшаговый подход обеспечивает создание упорядоченной пористой структуры с оптимальным сочетанием мелких и крупных пор, способствуя улучшению теплоизоляционных и механических свойств материала. При этом вовлечение воздуха создает

исходную основу для равномерного распределения газовой фазы, а последующее газообразование увеличивает общий поровый объем смеси, не снижая ее прочностных характеристик [76].

Трехстадийный метод поризации ячеистобетонной смеси реализует комплексную технологию формирования пористой структуры, включающую три основные стадии. Первая стадия предполагает аэрацию песчаного шлама, осуществляемую в мельничном оборудовании с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые снижают поверхностное натяжение и способствуют образованию стабильных пузырьков воздуха в тонкодисперсной суспензии. Вторая стадия осуществляет аэрацию ячеистобетонной смеси непосредственно в смесителе, опять же посредством введения ПАВ, что усиливает процесс формирования и стабилизации воздушных пор внутри густой массы. Третья и заключительная стадия заключается в формировании пор за счет химического газообразования, приводящего к увеличению объема газовой фазы и формированию устойчивой ячеистой структуры. Этот комплексный метод позволяет существенно улучшить пористую архитектуру материала, что ведет к снижению его средней плотности без ухудшения прочностных показателей, а также способствует росту прочности на изгиб и особенно на растяжение, что критично для конструктивных свойств ячеистого бетона [77].

Баротермальный способ [58] поризации формовочной смеси представляет собой технологический процесс, при котором перемешивание компонентов осуществляется в герметичной мешалке с одновременной обработкой насыщенным водяным паром. В течение 3–4 мин создается избыточное давление в пределах 1–2 кг/см², что оказывает значительное влияние на структуру смеси. Поддержание повышенного давления препятствует началу и развитию центров газообразования за счет сдерживания роста пузырьков газа на ранних этапах, позволяя сохранить однородность массы. Одновременно насыщенная паровая атмосфера в смесителе обеспечивает сохранение воды затворения в жидкой фазе,

что предотвращает преждевременное высыхание и способствует формированию пластично-вязкой консистенции. Такая структура смеси обеспечивает дальнейшее получение формованных изделий с однородной и стабильной пористостью, повышая технологическую и эксплуатационную надежность ячеистобетонных материалов.

Способ насыщения формовочной смеси воздухом под давлением предполагает создание в герметичном смесителе давления воздуха примерно 0,7 МПа и интенсивное перемешивание смеси при этом условии. В результате смесь насыщается воздухом и позже, после выдачи в форму, вспучивается. Эффективность данного метода увеличивается с добавлением воздухововлекающих добавок в раствор для повышения степени насыщения воздуха [78].

Эффективность применения рассматриваемого метода значительно повышается при использовании специализированных воздухововлекающих добавок, вводимых в растворную смесь. Рекомендуемый режим работы предусматривает поддержание давления воздуха в смесителе на уровне приблизительно 0,7 МПа, что обусловлено оптимальными технологическими параметрами процесса. Однако при наличии обоснованного технико-экономического анализа допускается корректировка данного значения, позволяющая адаптировать процесс к конкретным производственным условиям и целям.

Воздухововлекающие добавки относятся к классу поверхностно-активных органических соединений, активно взаимодействующих с компонентами бетонной смеси. Их основная функция заключается в обеспечении захвата мельчайших воздушных пузырьков в процессе интенсивного перемешивания, а также в равномерном распределении этих пузырьков по всему объему материала. Механизм действия таких добавок базируется на насыщении бетонной и растворной смеси микропузырьками воздуха, с размерами в диапазоне от 0,015 до

0,030 мм. Эти микропоры выполняют роль своего рода смазочного агента, снижая трение между частицами заполнителя и облегчая их перемещение друг относительно друга в системе, что благоприятно сказывается как на технологической пластичности смеси, так и на конечных свойствах материала.

Воздухововлекающий эффект достигается благодаря введению добавок в виде щелочных мыл либо за счет формирования таких мыл непосредственно в смеси. Второй механизм основывается на реакции нейтрализации гидроксидов, образующихся в процессе гидратации цемента, что ведет к созданию пенообразующих структур в растворе. При увеличении концентрации воздухововлекающего вещества происходит снижение поверхностного натяжения среды, что улучшает условия удержания воздуха в виде устойчивой пены.

Оптимальные концентрационные параметры добавок должны обеспечивать максимальную стабильность образуемой пены, что достигается при адсорбционном насыщении на границе раздела фаз «раствор – воздух». Именно в этой точке происходит максимально эффективное образование и закрепление тонкопленочных структур вокруг пузырьков воздуха. Для уменьшения размеров пузырьков и повышения однородности воздушной эмульсии необходимо дополнительно сокращать поверхностное натяжение раствора, что реализуется за счет повышения концентрации поверхностно-активного вещества.

Долговременная стабилизация воздушной эмульсии достигается за счет действия кальциевых мыл, которые прочно закрепляются в адсорбционных оболочках пузырьков воздуха, формируя устойчивые пленочные структуры. Это препятствует коалесценции (слиянию) пузырьков, сохраняя равномерную пористость и улучшая свойства конечного материала. Классификация воздухововлекающих добавок и их структурные особенности представлены на рисунке 1.12, который систематизирует разные типы и группы добавок в зависимости от химической природы и функциональных характеристик.

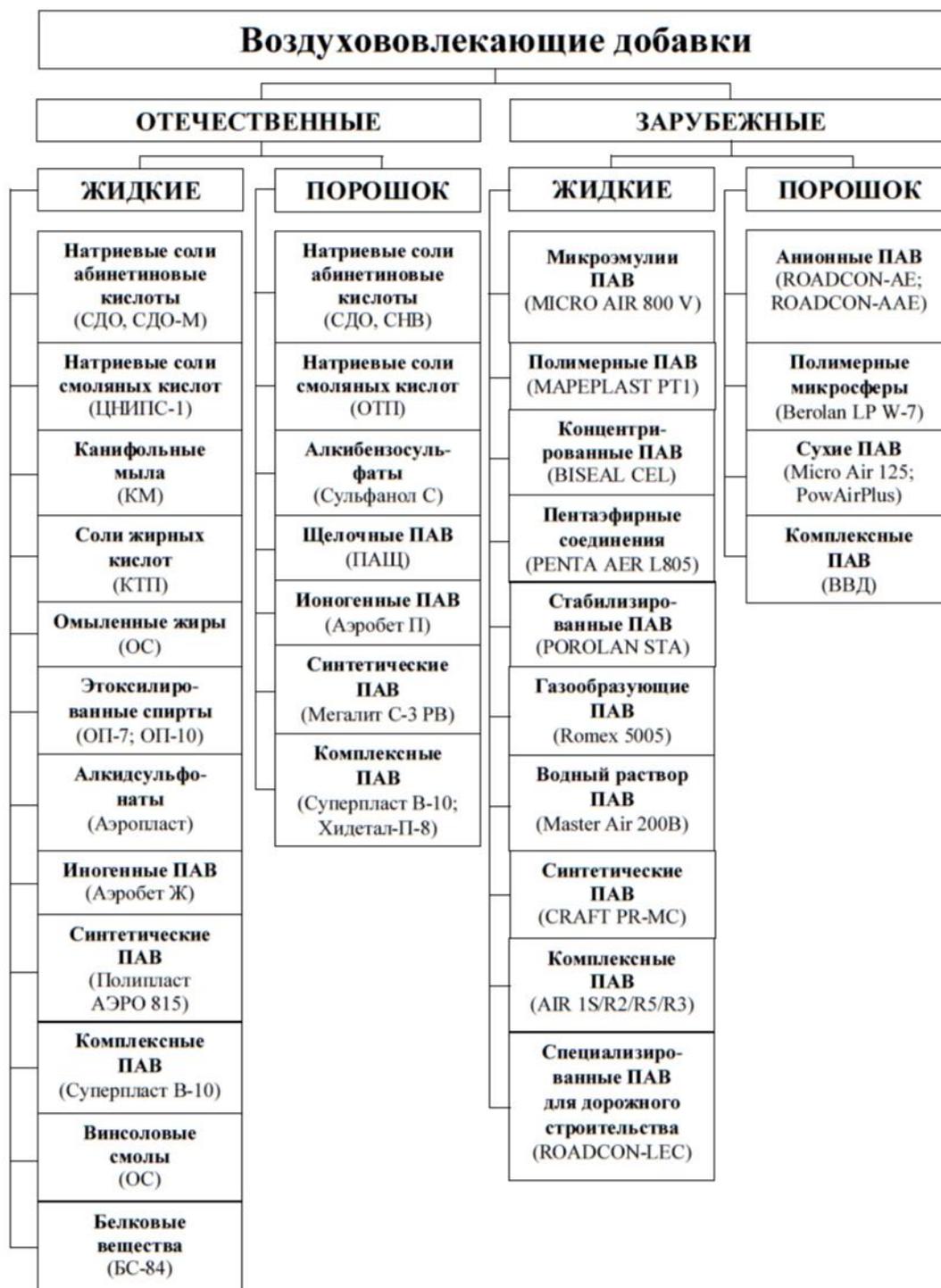


Рисунок 1.12 – Классификация воздухововлекающих добавок

Помимо широко распространенных химических и механических методов поризации, существует ряд альтернативных, зачастую экспериментальных, подходов к формированию пористой структуры ячеистых бетонов, основанных на различных физических и биологических принципах.

Механический способ поризации, отличный от пенообразования, заключается во введении в состав бетонной смеси готовых пористых

заполнителей, таких как вспученный перлит, вермикулит, керамзитовый песок или шлаковая пемза [79]. В данном случае итоговая пористость материала формируется как за счет внутренней пористости самих гранул заполнителя, так и за счет межзерновых пустот в их каркасе, сцементированном вяжущим. Ключевой задачей при использовании этого метода является подбор оптимального режима перемешивания, поскольку избыточное механическое воздействие может привести к разрушению хрупких пористых зерен и, как следствие, к нежелательному увеличению средней плотности конечного изделия.

Вакуумный способ формирования ячеистобетонных изделий предусматривает воздействие на формовочную массу величиной вакуума от 0,011 до 0,079 МПа в течение 5–20 мин с целью улучшения физико-механических характеристик бетона [77, 80].

Вибровакуумный способ [39] предложен для создания пористой структуры материала, сущность которого заключается в следующем (без введения традиционных порообразователей): в формовочную массу вводятся измельченные пористые частицы, в порах которых находится защемленный воздух, давление которого равно атмосферному. Для вспучивания смеси в этом случае необходимо создать над ней давление ниже атмосферного и снижать его до тех пор, пока не будет преодолено сопротивление смеси вспучиванию (вакуум до 0,099 МПа). Одновременно, с целью снижения вязкости, дефектности и повышения однородности структуры материала, смесь во время вспучивания вибрируют. В процессе такого воздействия воздух извлекается из пор зерен и равномерно поризует формовочную массу. В этом участвует также воздух, адсорбированный на поверхности твердой фазы, вовлеченный в смесь при ее перемешивании и растворенный в воде.

В качестве пористых зерен могут использоваться перлитовая пудра, зола-уноса, трепел, диатомит и другие наполнители. В смесь могут вводиться воздухововлекающие, пено-, газообразующие добавки. Изменяя состав смеси и режим вибровакуумирования, можно получать ячеистые бетоны с заданными

характеристиками. При этом каждому составу формовочной массы соответствует свой, оптимальный режим обработки.

Следует отметить, что несмотря на разнообразие рассмотренных способов и значительное количество исследований, посвященных совершенствованию технологии получения ячеистых бетонов, процессы, протекающие в момент формирования пористой структуры при вакуумировании, остаются недостаточно изученными. В частности, отсутствуют комплексные данные о влиянии температурного фактора на интенсивность газовыделения, устойчивость пузырьков воздуха в цементном тесте, скорости релаксации давления и степени схватывания смеси.

Не установлен также характер взаимодействия тепловых и вакуумных полей в объеме формовочной массы, что ограничивает возможность точного прогнозирования параметров структуры получаемого материала. Отсутствие систематизированных экспериментальных зависимостей «температура – пористость – прочность» при различных уровнях вакуума не позволяет на сегодняшний день определить оптимальные технологические режимы, обеспечивающие формирование устойчивой и равномерной пористой структуры.

Таким образом, температурное воздействие в процессе вакуумирования представляет собой один из наименее исследованных факторов, требующий дальнейшего теоретического и экспериментального анализа с применением современных методов термовакуумной диагностики и моделирования. Только углубленное изучение этих закономерностей позволит создать научно обоснованные режимы формирования структуры ячеистых бетонов при одновременном воздействии температуры и пониженного давления, что в перспективе обеспечит повышение качества и эксплуатационной надежности изделий данного класса.

1.3. Давление внешней фазовой среды как фактор управления структурообразованием ячеистого бетона

Ячеистый бетон и изделия на его основе по эксплуатационным свойствам являются универсальными, что значительно повышает их эффективность и

конкурентоспособность с аналогичными по назначению материалами в условиях рыночной экономики. Одними из основных востребованных свойств ячеистого бетона являются:

- низкая средняя плотность (500–600 кг/м³, что почти вдвое меньше массы керамзитобетонных изделий и в 3–4 раза меньше массы кирпичных стен);
- низкая теплопроводность (0,12–0,14 Вт/(м·°С), по сравнению с 0,4–0,5 Вт/(м·°С) для керамзитобетонных изделий и 0,7–1,0 Вт/(м·°С) для керамического кирпича);
- относительно высокая прочность до 4 МПа;
- высокая морозостойкость, достигающая 50–100 циклов переменного замораживания и оттаивания;
- повышенная паропроницаемость (0,13–0,15 мг/(м·ч·Па)), что ставит этот материал по санитарно-гигиеническим требованиям на второе место после деревянных конструкций (с точки зрения поддержания в жилых помещениях нормального температурно-влажностного режима) [58].

Достигнуть повышенных эксплуатационных свойств ячеистого бетона возможно путем подбора оптимального состава смеси и внедрения в технологическую линию производства новых видов и способов управления структурообразованием.

Авторами [81, 82] разработан и успешно апробирован в промышленных условиях баротермальный метод поризации формовочной смеси. Принцип данного метода заключается в том, что газобетонная смесь при интенсивном перемешивании размещается в герметичном смесителе, где обрабатывается насыщенным водяным паром в течение 3–4 мин. В течение этого времени в смесительной камере создается избыточное давление, достигающее 1–2 кг/см². Полученная таким образом масса сохраняет пластично-вязкие характеристики, что позволяет оперативно укладывать ее по формам для последующей обработки и твердения. Поддержание высокого давления в смесителе препятствует формированию центров газовых пузырьков, а насыщенная паровая среда

способствует сохранению воды затворения в жидком состоянии. Такие условия обеспечивают оптимальные пластично-вязкие свойства смеси, что значительно улучшает процесс вспучивания при температуре 100–120 °С, тогда как при обычном перемешивании этот показатель составляет всего 30–40 °С.

Авторами [83] предложен и внедрен метод формирования ячеистобетонных массивов высотой до 60 см с использованием технологии под давлением, осуществляемой при помощи щита-пригруза. Применение данного способа ускоряет как процесс вспучивания, так и твердения ячеистобетонной смеси. Кроме того, такой подход предотвращает появление дефектов в виде «горбушки» на поверхности изделия и позволяет сократить расход строительных материалов примерно на 10 %, что делает технологию экономически эффективной.

Вакуумный метод формования ячеистобетонных изделий предусматривает обработку формовочной массы разрежением от 100 до 700 мм рт. ст. в течение 5–20 мин для улучшения физико-механических характеристик, однако отсутствие механизма интенсификации газообразования ограничивает достижение оптимальной пористости. В условиях вакуума с одновременной виброобработкой смесь цемента и песка или песчанистых промышленных отходов с минимальным количеством пенообразователя укладывается в формы и помещается в вакуумную камеру с пониженным давлением, что способствует расширению воздуха в порах и более эффективному формированию равномерной пористой структуры. При этом поризация смеси может осуществляться за счет предварительного насыщения ее сжатым воздухом в герметичном смесителе с последующей выгрузкой в формы, где перепад давления обеспечивает интенсивное вспучивание. Для сохранения структуры и однородности пористого материала в таких системах используются воздухововлекающие добавки [84–86].

Автором [87] предложен способ получения газобетона в герметизированных кассетных установках, отличающийся высокой прочностью, морозостойкостью. Этот способ позволил исключить период предварительной выдержки, так как производится немедленный нагрев газобетона после окончания процесса

вспучивания и исключаются работы по срезке «горбушки», что не требует дополнительных затрат на утилизацию и переработку.

Принцип действия вибровакуумного метода поризации формовочной массы базируется на введении в исходную смесь измельченных пористых частиц, внутренние поры которых содержат воздух с давлением, эквивалентным атмосферному. При последующем технологическом этапе над поверхностью смеси создается разрежение, или вакуум, давление которого снижается ниже атмосферного уровня до величины, позволяющей преодолеть сопротивление смеси против ее вспучивания. Величина создаваемого вакуума может достигать до 0,099 МПа, что достаточно для инициирования расширения и разрыхления структуры благодаря выходу воздуха из пороидальных частиц.

Важной особенностью этого метода является сочетание вакуумирования с вибрационным воздействием на смесь. Вибрация способствует снижению вязкости материала в процессе вспучивания, что уменьшает возникновение дефектов в структуре и способствует формированию более однородной ячеистой структуры. Под действием вибрационных колебаний происходит более эффективное вытеснение воздуха из пор зерен, что ведет к равномерному распределению микропор в массе смеси. Такой комплексный подход позволяет добиться улучшенного структурного состава формовочной массы с

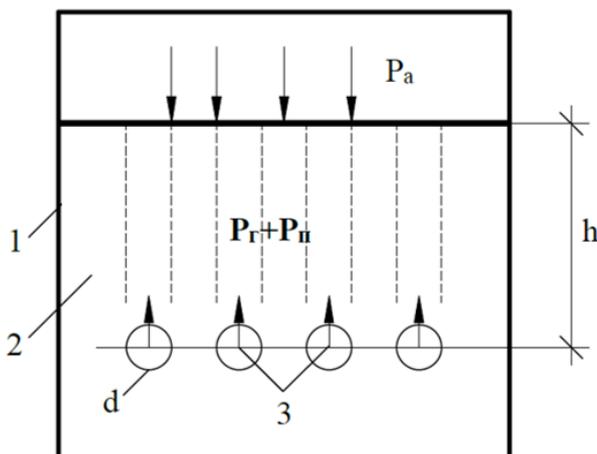


Рисунок 1.13 – Идеальная структура ячеистого бетона: 1 – сосуд; 2 – поризованная формовочная смесь; 3 – газовые пузырьки диаметром d

минимизацией включений и дефектов, что повышает качество и эксплуатационные характеристики получаемого ячеистого материала [80].

Для теоретического обоснования вибровакуумного метода поризации формовочной смеси был проанализирован процесс вспучивания на определенной модели (рисунок 1.13).

Автором [88] установлена взаимозависимость между давлением газовой фазы, находящейся в формовочной массе, и ее ключевыми реологическими и гравитационными характеристиками, а также размерами пор, давлением окружающей среды и значением поверхностного натяжения раствора. Важным достижением данного исследования стало уточнение классического уравнения Рэлея-Плессета, которое описывает динамику расширения и сжатия газовых пузырьков в жидкости с вязкой средой. Этот теоретический вклад позволил обосновать и рекомендовать оптимальные технологические режимы, при которых возможно управление внешним давлением газовой фазы для формирования высокопористой структуры с контролируемыми параметрами. В частности, это обеспечивает эффективную поризацию высоковязких композиций и способствует производству неавтоклавного ячеистого бетона с существенным улучшением эксплуатационных характеристик, таких как прочность, теплоизоляция и долговечность.

Установлено [80], что в процессе формирования ячеистой структуры с течением времени микрообъемы газа, аккумулированные в порах, начинают оказывать возрастающее давление на окружающую формовочную смесь. Вспучивание массы, выраженное в увеличении ее объема, не происходит до тех пор, пока внутреннее давление газа не превысит сумму внешнего давления среды и вязкого сопротивления самой смеси. Следовательно, для инициирования и устойчивого развития вспучивания необходимо обеспечить рост объема каждого газового пузырька посредством повышения давления.

При этом необходимо учитывать и влияние давления пара, которое формируется внутри пузырей при повышении температуры формовочной массы. Согласно закону Паскаля, давление внутри массы должно приводить к равномерному увеличению объема во всех направлениях. Однако практическая ситуация осложняется тем, что масса ограничена герметичными или жесткими барьерами со всех сторон, кроме верхней поверхности, вследствие чего фактическое вспучивание происходит преимущественно в вертикальном направлении. Величина изменения объема каждого газового пузырька

ограничивается как внутренними механическими сопротивлениями формовочной смеси, так и аэростатическим давлением атмосферы, находящейся над ее поверхностью. Именно взаимодействие этих факторов определяет параметры и равномерность пористой структуры конечного ячеистого материала.

Таким образом, усилие, противодействующее вспучиванию, равно:

$$\frac{\pi d^2}{4} h \rho_c g + \frac{\pi d^2}{4} P_a + \pi d \sigma + \pi d h (\tau_0 + \eta \frac{dv}{dx}), \quad (1.1)$$

где P_a – давление среды над формовочной смесью, Па; d – диаметр поры, м; h – расстояние поры от поверхности, м; ρ_c – средняя плотность формовочной массы до вспучивания, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; η – коэффициент пластической вязкости, Па · с; $\frac{dv}{dx}$ – градиент изменения скорости деформации на единицу расстояния, с⁻¹; a – поверхностное натяжение, Н/м.

Соответственно, вспучивание формовочной смеси возможно при следующих условиях:

– при отсутствии вибровоздействия (1.2):

$$P_{II} + P_{Г} - P_a = h \rho_c g + \frac{4\sigma}{d} + 4 \frac{h}{d} (\tau_0 + \eta \frac{dv}{dx}), \quad (1.2)$$

где $P_{Г}$ и P_{II} – давление в газовой фазе поры соответственно водорода и водяного пара.

– при наличии интенсивного вибровоздействия, когда $\tau_0 = 0$ (1.3):

$$P_{II} + P_{Г} - P_a = h \rho_c g + \frac{4\sigma}{d} + 4 \frac{h}{d} \eta \frac{dv}{dx}. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.1) позволяет получить качественную оценку процесса вспучивания при условии, что все его параметры, кроме d , являются постоянными. Для точного расчета давления в газовой поре в любой заданный момент времени для конкретной смеси необходимо экспериментальным путем определить все включенные в уравнение величины.

В экспериментальных исследованиях автора [89] доказано, что оперативное применение внешнего давления газовой фазы на этапах вспучивания и выдержки

массива способствует снижению дефектности макроструктуры и повышению прочностных характеристик газосиликата низкой плотности. Внешнее давление выступает ключевым фактором, препятствующим разрушению структуры, вызванному чрезмерным внутривязным давлением газа на заключительном этапе формирования пор. Разработанный технологический принцип динамического управления макроструктурообразования газосиликата позволяет корректировать процесс поризации при отклонениях технологических параметров от оптимальных значений.

Для определения оптимального диапазона прикладываемого давления проведены эксперименты по оценке интегральной характеристики качества – показателя конструктивного качества (ККК). Результаты этих исследований представлены на рисунке 1.14.

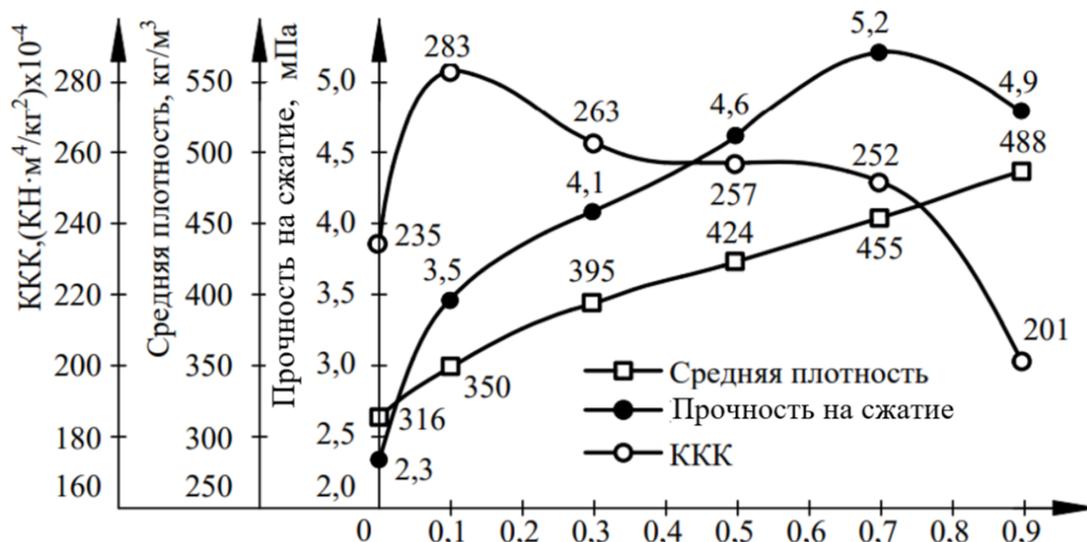


Рисунок 1.14 – Зависимости средней плотности, прочности на сжатие и показателя ККК газосиликата оптимальной структуры от величины давления внешней газовой фазы

Воздействие оптимального статически приложенного давления внешней газовой фазы на поризующуюся систему при заранее подобранном рецептурном составе позволяет повысить показатель конструктивного качества до величин 250–270, тогда как среднеотраслевой уровень не превышает 150–180, что подтверждает выдвинутую рабочую гипотезу. Оптимальным считается давление около 0,2 атм, при котором устанавливается равновесие между внешними и

внутренними силами, а межпоровые перегородки уплотняются без существенного истончения [89].

Таким образом, получение пористой структуры ячеистого бетона может осуществляться не только за счет газообразователей, как это следует из уточненного уравнения Рэлея–Плессета, но и благодаря управляемому внешнему давлению газовой фазы [90].

Наличие в ячеистом бетоне воздушных пор и большого количества влаги способствует при интенсивной термообработке быстрому парообразованию внутри прогреваемого массива и создает значительное внешнее фазовое давление в его толщине. Это следует из уравнения Рэлея–Плессета (1.4):

$$P_G + P_{ВП} \geq P_a + \rho_{см} gH + \rho_{см} \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta\dot{R}}{R} + P_{изб} \quad (1.4)$$

где P_G и $P_{ВП}$ – давление газа и водяного пара в пузырьке; P_a и $P_{изб}$ – атмосферное и избыточное давления над смесью; $\rho_{см}$ – плотность смеси; H – высота столба смеси над пузырьком; R – радиус пузырька; \dot{R} и \ddot{R} – скорость и ускорение при росте пузырька; σ – поверхностное натяжение; η – коэффициент пластической вязкости.

В соответствии с уточненной формулировкой уравнения Рэлея–Плессета (1.4), ключевым фактором, определяющим процесс формирования ячеистой структуры неавтоклавного бетона, является разность давлений, действующих на поризуемую массу. Основной механизм поризации активируется при снижении внешнего давления до значений, близких к вакуумным, в диапазоне от 0,06 до 0,095 МПа. Такая редукция давления способствует расширению газовых пузырьков внутри массы, что обеспечивает формирование стабильной и равномерной пористой структуры.

Традиционно для производства газобетона используется повышенная концентрация газообразователей, которые выделяют газ непосредственно внутри цементной матрицы, обеспечивая тем самым образование пористой структуры. Однако уравнение Рэлея–Плессета (1.4), адаптированное к ячеистобетонной

смеси, демонстрирует, что требуемый уровень пористости может быть достигнут не только за счет увеличения объема газообразования, но и посредством целенаправленного регулирования внешнего давления газовой фазы. Управление этим параметром позволяет оптимизировать процесс поризации, снижая потребность в высоких дозах газообразователей и повышая качество и однородность ячеистой структуры неавтоклавного бетона, что в конечном итоге улучшает эксплуатационные характеристики материала [90].

Исследование показало, что научная общественность регулярно разрабатывает все более совершенные методы поризации формовочных масс, расширяет технологические подходы к управлению структурообразованием ячеистого бетона и внедряет новые способы регуляции процесса за счет давления окружающей газовой среды (рисунок 1.15).

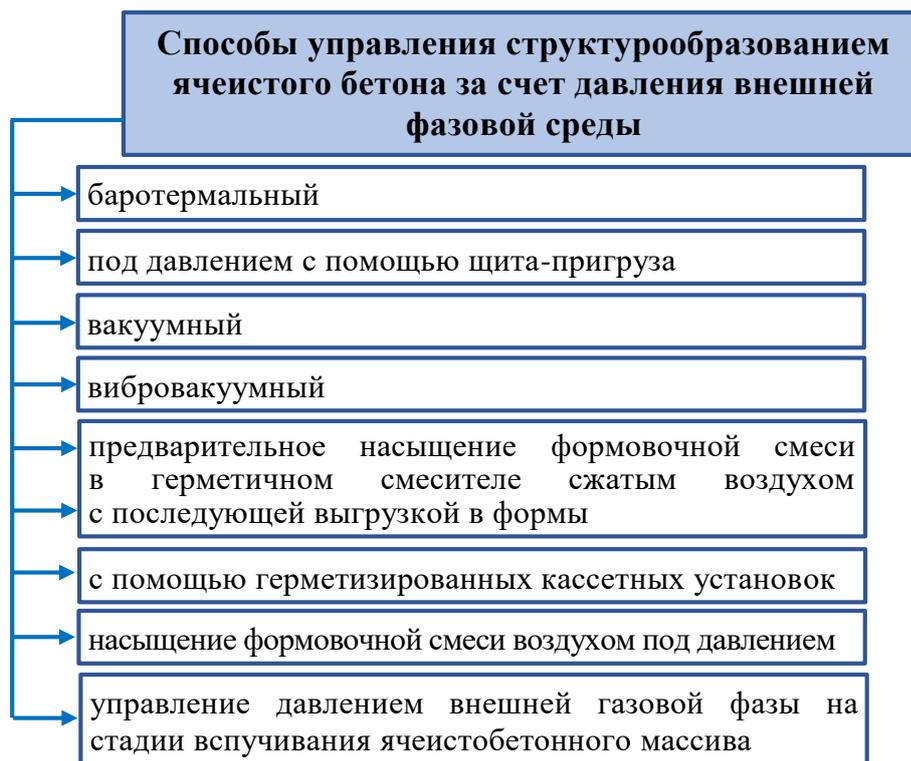


Рисунок 1.15 – Способы управления структурообразованием ячеистого бетона за счет давления внешней фазовой среды

Таким образом, проведенные исследования и внедренные технологические решения убедительно демонстрируют, что управление процессом поризации ячеистого бетона возможно как классическими методами газо- и

пенообразования, так и с использованием физических факторов – вакуума, избыточного давления, вибрационных воздействий и их комбинации. Выявлено, что внешнее давление газовой фазы, приложенное на стадии вспучивания, при рационально подобранных параметрах, обеспечивает достижение оптимального баланса между внутренними и внешними силами, препятствует возникновению деструктивных напряжений в межпоровых перегородках и способствует формированию более однородной, стабильной макроструктуры.

При этом математическая интерпретация процессов вспучивания, уточненная через уравнение Рэля–Плессета, адаптированное к ячеистобетонной смеси, позволила не только качественно описать взаимосвязь давления газовой фазы с вязкостью, прочностью и геометрическими параметрами пор, но и обосновать новые режимы поризации, которые обеспечивают возможность получения высокопоризованных композиций без увеличения расхода порообразователей.

Тем не менее, установлено, что воздействие температурного фактора в совокупности с изменением внешнего давления, особенно при вакуумировании, остается недостаточно исследованным, что открывает перспективы дальнейших экспериментальных работ в направлении термовакuumного моделирования процессов вспучивания для создания научно обоснованных режимов получения изделий с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

1.4. Повышение эффективности ячеистых бетонов неавтоклавного твердения

Одним из перспективных строительных материалов является экологически чистый негорючий неавтоклавный ячеистый бетон с качественной поровой структурой и заданными теплофизическими и эксплуатационными свойствами. Для повышения прочности при неизменной плотности важна устойчивость ячеистой структуры и прочность матрицы поризованного материала. Ключевыми факторами формирования структуры и свойств являются рецептурные и технологические параметры. Исследования показывают, что рецептурные

факторы оказывают решающее влияние на свойства ячеистого бетона, а также разработаны методологии научного анализа таких материалов с применением синергетического и неравновесно-термодинамического подходов [91–97].

Минеральные добавки повышают устойчивость смеси, способствуют мелкопористой структуре и увеличению прочности цементного камня, при этом эффективность зависит от последовательности их введения. Полевошпатово-кварцевые породы и кислые золы проявляют высокую алюминатную активность, взаимодействуя с растворами гипса и извести и образуя гидросульфалюминатные соединения калия, натрия и кальция [98–100].

Проведены комплексные исследования рациональных параметров компонентов пенобетона с повышенными эксплуатационными свойствами [101]. Установлено, что использование тонкодисперсного шлака в количестве до 15 % от массы цемента, микрокремнезема в дозировке 8–10 % и модификатора МБ-Б-II-2 позволяет снизить теплопроводность пенобетона до 0,08–0,12 Вт/(м·°С) при одновременном повышении прочности на 25–30 %. При этом оптимальные параметры ускорителя твердения АС для мелкозернистого бетона составляют 2–3 % от массы цемента.

В исследованиях модифицированного теплоизоляционного пенобетона повышенной прочности с применением микрокремнезема [102] показано, что введение микрокремнезема в количестве 5–8 % от массы цемента в сочетании с пластификаторами нового поколения обеспечивает получение пенобетона плотностью 400–600 кг/м³ с прочностью на сжатие 2,5–4,0 МПа и теплопроводностью 0,10–0,14 Вт/(м·°С). Физико-химический механизм взаимодействия цементного раствора и пластификатора основан на формировании дополнительных гидросиликатов кальция за счет пуццолановой реакции активного микрокремнезема с гидроксидом кальция.

Разработаны составы композиционных вяжущих повышенной прочности [103–111], где обязательными компонентами являются высокоактивные

тонкодисперсные минеральные наполнители: микрокремнезем, метакраин, зола-уноса и другие активные минеральные добавки. Комплексное использование указанных компонентов позволяет получать высокопрочные бетоны с пределом прочности при сжатии до 80–100 МПа за счет оптимизации гранулометрического состава и повышения плотности упаковки частиц.

Учеными [107] исследованы бесцементные вяжущие из зольнокремнеземистых композиций с использованием высококальциевой золы-уноса, ультрадисперсного микрокремнезема и солевых стоков. Установлено, что оптимальным является состав, содержащий 2 % солевых стоков от массы сухих компонентов смеси, который обеспечивает получение композиции с прочностью на сжатие в 28 сут 35,6 МПа, сопоставимой с прочностью цементного вяжущего.

Разработан новый способ приготовления пенобетона [108], включающий предварительную комплексную механоактивацию смеси из портландцемента, жидкого стекла, алюминиевой пудры и воды. Данная технология позволяет получать пенобетон с улучшенными физико-механическими свойствами за счет более равномерного распределения пор и повышения прочности межпоровых перегородок.

Особое место среди рецептурных факторов занимают золы-уноса различных типов электростанций. Учеными [110] проведены комплексные исследования использования золы-уноса в бетонах различного назначения. Установлено, что кислые золы можно классифицировать как активные минеральные добавки с пуццолановыми свойствами, а кальциевые золы как активные минеральные добавки, обладающие одновременно пуццолановыми и гидравлическими свойствами. При этом замена до 20 % цемента золой-уноса обеспечивает повышение прочности бетона на 10–15 % в поздние сроки твердения.

Исследован ячеистый бетон автоклавного твердения на основе золы-уноса Экибастузской ГРЭС-2 и комплексной алюмосодержащей добавки [112].

Разработанные составы обеспечивают получение ячеистого бетона марки $D500–D700$ с прочностью класса $B2,5–B3,5$ и теплопроводностью $0,12–0,16$ Вт/(м·°С).

Изучено влияние золы-уноса с повышенным содержанием и добавкой ацетоноформальдегидаминной смолы на структурообразование цементного камня [113]. Установлено, что введение золы и добавки в количестве до 25 % от массы цемента способствует более интенсивному набору прочности при длительных сроках твердения за счет протекания пуццолановой реакции и образования дополнительных гидросиликатов кальция.

Экспериментальные исследования выявили специфическую роль золы-уноса в процессах структурообразования пенобетонной смеси [114]. Композитное вяжущее, полученное путем совместного помола исходных компонентов, демонстрирует значительное повышение предела прочности на сжатие при одновременном сокращении расхода цемента.

Введение золы-уноса в состав влияет на гидратационные процессы клинкерных минералов цемента. Активный кремнезем, входящий в структуру золы-уноса, реагирует с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который является одним из продуктов гидратации цемента, подавляя при этом образование портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ в кристаллической форме). Это взаимодействие способствует формированию более плотной и однородной микроструктуры цементного камня за счет образования дополнительных гидросиликатных фаз, повышающих плотность и прочностные характеристики материала. Таким образом, использование золы-уноса не только оптимизирует расход цемента, но и улучшает микроструктурные свойства пенобетонного композита, способствуя увеличению долговечности и эксплуатационной надежности конечного продукта [115].

В зарубежных исследованиях акцент смещен на разработку наноструктурированных вяжущих и высокоэнергетические методы активации. Учеными [116] предложено использование бесцементного кремнийорганического вяжущего, получаемого полимеризационно-конденсационным способом, что

позволяет достичь прочности 4–6 МПа при плотности 300–400 кг/м³ и теплопроводности 0,07–0,09 Вт/(м·°С). Данное вяжущее характеризуется повышенной экологичностью и может производиться при нормальных условиях без автоклавной обработки.

Установлено, что введение фурфурилового спирта в качестве растворителя-стабилизатора пены повышает однородность пор до 85 % и увеличивает морозостойкость до F_{100} [117]. Механизм действия основан на образовании защитных пленок на поверхности пор, препятствующих их слиянию и разрушению при циклическом замораживании.

Проведены исследования ультралегкого пенобетона, где показано, что плотность материала и процесс пенообразования значительно влияют на скорость выделения кислорода и формирование пористой структуры [118, 119]. Разработанные составы обеспечивают получение пенобетона плотностью 150–300 кг/м³ с сохранением достаточной прочности для теплоизоляционных целей.

Исследовано производство легкого пенобетона с устойчивыми материалами, включая известняковую пыль как частичную замену цемента в сочетании с пенообразователем и микрокремнеземом [120]. Химический анализ и тонкость помола показали большое сходство известняковой пыли с цементом. Замена 14 % цемента известняковой пылью обеспечивает повышение прочности на раннем этапе твердения при снижении плотности материала.

Учеными [121] исследован керамзитопенобетон как инновационный легкий строительный материал, формируемый интеграцией керамзита в пенобетон. Установлены сильные линейные зависимости: содержание пены отрицательно коррелирует с плотностью, прочностью и коэффициентом размягчения, но положительно коррелирует с теплопроводностью и водопоглощением. Увеличение содержания пены также увеличивает средний размер пор.

Технологические факторы оказывают физическое воздействие на структурообразование ячеистого бетона и контролируются параметрами обработки от температуры и давления до специализированных методов активации. Учеными [122, 123] исследовано управление тепловыделением в пенобетонных смесях при тепловлажностной обработке, которое реализуется рациональным подбором состава смеси и регулированием температурного градиента в камере предварительного твердения. Это обеспечивает прочность на 1 сут до 55–70 % марочной и повышает конечную прочность на 15–35 %.

В работе [124] установлено, что совместное температурное и вакуумное воздействие на смесь при использовании медленносхватывающихся цементных вяжущих увеличивает прирост пластической прочности в 50 раз и сокращает время обработки при вакуумировании в 1,5–9 раз, что упрощает технологию и расширяет сырьевую базу.

Разработана энергосберегающая технология совместного помола золы и силикат-глыбы, затворенных водой, в присутствии измельчающих тел (гидромеханоактивация), которая снижает энергозатраты при производстве композиционных зольных вяжущих [125]. Такие вяжущие позволяют получать ячеистые и коррозионностойкие бетоны без дополнительного термического воздействия.

Предложен вибровacuумный способ изготовления неавтоклавного ячеистого бетона, предусматривающий формовочную массу с пористыми частицами, из которых извлекается воздух при вакууме 0,04–0,09 МПа и температуре 60–90 °С с одновременным вибрированием, что обеспечивает равномерное поризование и снижает дефектность структуры [80].

Исследовано применение оптимальных технологических режимов малоэнергоемкого переменного электрического поля для активирования пено- и фибропенобетонов [126]. Установлено, что такая обработка улучшает прочность

на сжатие на 19–21,6 %, снижает плотность на 1,9–2,5 % и теплопроводность на 9–25 %, при этом повышается паропроницаемость на 5,2–11,4 %.

Автором [127] разработан метод воздействия электрогидротеплосиловым полем на формирующуюся структуру ячеистого бетона, что позволяет управлять процессами структурообразования на стадии схватывания и твердения.

Зарубежными учеными [128, 129] предложена стратегия изготовления легких пенобетонов с высокой прочностью и долговечностью, используя полиметилгидросилоксан в качестве водоотталкивающего агента. Данная технология позволяет получать пенобетон с улучшенными характеристиками водостойкости и долговечности при сохранении низкой плотности.

Изучены механические свойства и способность поглощения энергии ячеистого аэрированного бетона [130]. Установлено, что ячеистый бетон производится путем введения пены, генерируемой из пенообразователей на белковой или синтетической основе, в свежую цементную пасту. Различные методы обработки и составы позволяют получать материалы с широким диапазоном плотностей и прочностных характеристик.

Применена ультразвуковая обработка пеномассы для снижения водоцементного отношения и формирования высокодефектной межпоровой перегородки, что увеличило прочность на 25 % по сравнению с традиционными методами [131]. Ультразвуковое воздействие частотой 20–40 кГц в течение 2–5 мин способствует более равномерному распределению пузырьков воздуха и повышению стабильности пенной структуры.

Исследованы характеристики пенобетона, содержащего относительно низкотемпературный кальцинированный метакаолин [132]. Данное исследование заполняет критический пробел в изучении характеристик пенобетона с использованием низкотемпературного кальцинированного метакаолина, что открывает возможности для более энергоэффективного производства.

В работе [133] представлен комплексный обзор устойчивого легкого пенобетона, включающий состав материалов, технологии производства, механические и тепловые характеристики, а также воздействие на окружающую среду. Исследование также рассматривает последние инновации, такие как интеграция дополнительных цементирующих материалов и передовые технологии пенообразования, подчеркивая их влияние на микроструктуру и функциональность.

Учеными [134] исследована возможность использования местных материалов, в частности трех различных порошковых средств (К, М и S), в качестве пенообразователей для производства легкого пенобетона. Данный подход открывает возможности для использования доступных местных материалов в качестве альтернативы дорогостоящим импортным пенообразователям.

Исследован инновационный подход к производству пенобетона путем изучения эффекта использования переработанных отходов пенобетона, обработанных в различные размеры легкого заполнителя [135-137]. Исследование предполагает замену 50 % объема заполнителя переработанными отходами пенобетона различных фракций. Оптимальный размер 4,75–9,50 мм обеспечивает повышение прочности на сжатие и растяжение при одновременном увеличении водопоглощения через 28 сут.

Результаты проведенного литературного обзора показывают, что в области повышения эффективности неавтоклавного ячеистого бетона достигнуты значительные успехи как в российских, так и в зарубежных исследованиях. Российская школа делает акцент на использовании местных техногенных отходов, особенно зол-уноса различных типов, и разработке энергосберегающих технологий. Зарубежные исследователи концентрируются на наноструктурированных системах, высокотехнологичных методах обработки и экологических аспектах производства. Комбинирование достижений обеих

научных школ открывает широкие перспективы для дальнейшего развития технологий неавтоклавного ячеистого бетона.

1.5. Выводы

1. Проведенный анализ современного состояния рынка свидетельствует о том, что неавтоклавные ячеистобетонные изделия завоевывают все более заметную долю в сегменте стеновых материалов. Активное использование промышленных отходов (золы-уноса, шлаков и побочных продуктов горно-обогатительного производства) в качестве заполнителей и минеральных добавок не только способствует решению экологических задач и уменьшает нагрузку на полигоны, но и позволяет снизить долю дорогостоящего цемента без ущерба для прочностных и теплоизоляционных свойств. При этом, возрастающие требования нормативов по энергоэффективности зданий и тренд на импортозамещение стимулируют застройщиков и производителей к переходу на отечественные технологии ячеистого бетона, что усиливает конкуренцию с автоклавными аналогами и формирует устойчивую нишу на рынке энергоэффективного жилья.

2. Управление формированием пористой структуры в неавтоклавных ячеистых бетонных массах основывается на комбинированном применении физико-химических механизмов и контролируемых вакуум-воздействиях. Физико-механические методы (интенсивная аэрация) способствуют равномерному распределению зарождающихся пузырей и предотвращают их слияние. При этом точный контроль внешнего давления на этапе формования позволяет стабилизировать размер и форму ячеек, снижая риск образования крупных дефектных пустот и чрезмерной тонкости перегородок. Вакуумные циклы способствуют дегазации сырьевых компонентов, корректируя геометрию пор, что гарантирует воспроизводимость структуры при минимальных затратах на порообразователи.

3. Термоваккумируемые режимы формования представляют собой синергетический этап, на котором тепловая обработка сочетается с пониженным

давлением для эффективной доводки структуры ячеистого бетона до требуемых эксплуатационных характеристик. Подогрев активизирует химические газообразующие реакции, ускоряя фазообразование и укрепляя перегородки пор за счет раннего схватывания и кристаллизации цементного камня. Пониженное давление способствует удалению свободного воздуха и избыточных газов, что устраняет микро- и макродефекты, поры с неравномерными стенками и зоны разрежения. В результате формируется однородная микроструктура, где ячейки имеют близкие размеры и ровные границы, что обеспечивает одновременно высокую прочность материала и стабильную теплоизоляцию, а также снижает расход химических добавок за счет повышения эффективности их использования именно на этапе формирования поровой структуры.

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-сертис», лаборатории ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ».

Оценка влияния рецептур, пропорций компонентов и технологических параметров производства на свойства неавтоклавногo ячеистого бетона выполнялась посредством сочетания теоретических расчетов и экспериментальных исследований. В качестве объектов анализа использовались образцы, изготовленные в лабораторных условиях и проверенные в профильных испытательных лабораториях и центрах сертификации. Для обработки и интерпретации полученных данных применялся комплексный научный подход, включающий системно-структурный анализ современных достижений в области строительных материалов.

2.1. Характеристика применяемых материалов

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Белгородский цементный завод», соответствующий ГОСТ 31108-2020 [138].

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.

Применявшийся цемент полностью соответствует предъявляемым к нему требованиям.

Таблица 2.2 – Минеральный состав и технические параметры портландцемента

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

Зола-уноса ГРЭС – тонкодисперсный продукт сжигания бурого угля, содержащий преимущественно оксиды кремния и алюминия (суммарно более 78 % от общей массы пробы). Такое значительное содержание оксидов должно содействовать высокой активности золы-уноса по отношению к портландцементу.

В качестве заполнителей в работе использовались зола-уноса Рефтинской ГРЭС (Свердловская область) и зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС (Республика Бурятия), соответствующие ГОСТ 25818-2017 [139] и ГОСТ 24211-2008 [140].

Химический состав и физико-механические характеристики зол-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС представлены в таблицах 2.3 и 2.4. Микроструктура зол-уноса представлена на рисунке 2.1.

Таблица 2.3 – Химический состав зол-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС

Заполнители	Химический состав, %									
	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	п.п.п.	прочее
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	57,7	3,39	1,88	5,56	26,4	0,23	0,47	0,34	1,32	2,71
Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС	52,1	4,7	1,48	6,12	25,9	1,1	1,34	0,75	3,18	3,33

Таблица 2.4 – Физико-механические характеристики зол-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС

Показатель	Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС
Внешний вид	Порошок темно-серый	Порошок светло-серый
Остаток на сите 008, %	34,3	38,5
Остаток на сите 004, %	11,4	13,7
Истинная плотность зерен, кг/м ³	1930 ± 50	1970 ± 50
Насыпная плотность, кг/м ³	790 ± 50	820 ± 50
Удельная поверхность, м ² /кг	260	280

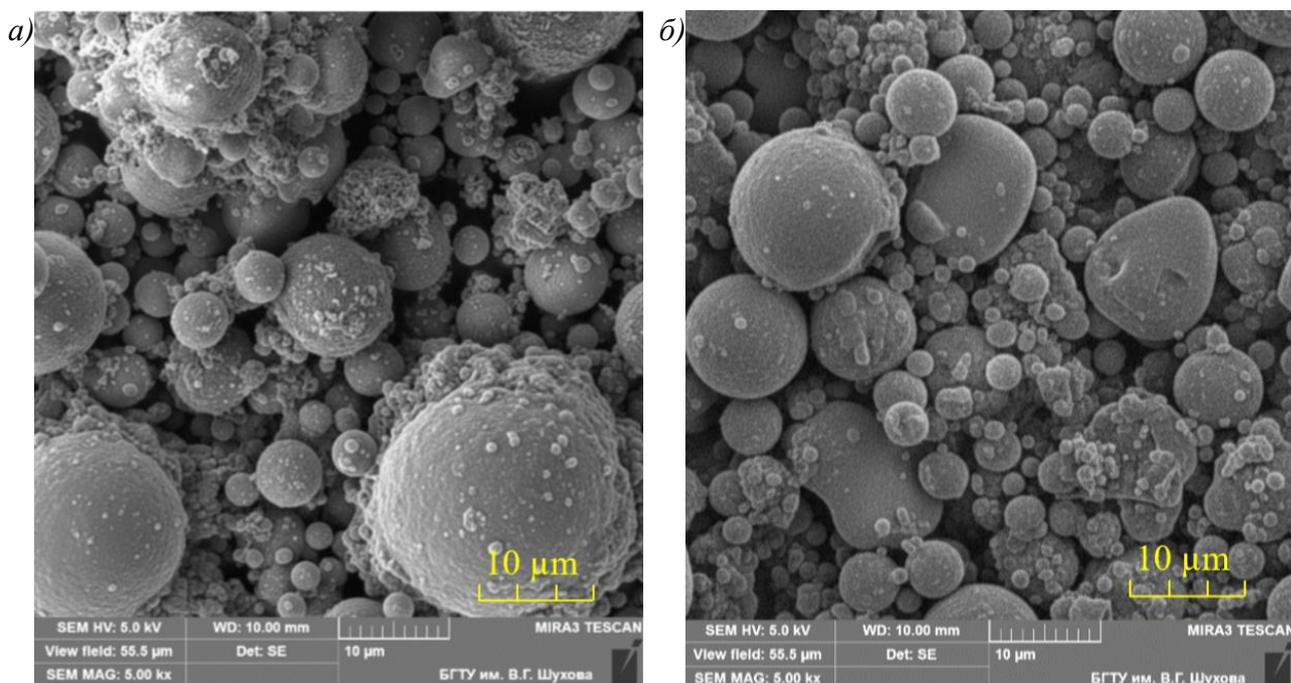


Рисунок 2.1 – Микроструктура зол-уноса: *а* – Рефтинской ГРЭС; *б* – Гусиноозерской ГРЭС

В качестве воздухововлекающих добавок были использованы Полипласт АЭРО 815, Аэропласт и АЭРОМИКС.

Воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815, изготовленная ООО «Полипласт-УралСиб» (г. Первоуральск, Свердловская обл.) по ТУ 5745-090-58042865-2014 [141], представляет собой водный раствор смоляной кислоты с плотностью не менее 0,998 г/см³ и pH не менее 9. Основным активным компонентом является абиетиновая кислота C₂₀H₃₀O₂ с молекулярной массой 302 г/моль, получаемая из живичных смол хвойных пород. Молекулярная структура включает трициклическое фенантреновое ядро с карбоксильной функциональной группой, что обеспечивает амфифильные свойства и

селективную адсорбцию на границе раздела фаз. Критическая концентрация мицеллообразования составляет $1,2 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Воздухововлекающая добавка Аэропласт на основе модифицированных полиметиленафталинсульфонатов, изготовленная ООО «Полипласт Новомосковск» (г. Новомосковск, Тульская обл.) по ТУ 5745-030-58042865-2008 [142], характеризуется плотностью 1,18-1,22 г/см³ и умеренно щелочной реакцией среды с рН 8-11. Молекулярная масса активного компонента составляет 378 г/моль, критическая концентрация мицеллообразования равна $2,1 \cdot 10^{-3}$ моль/л, что является наиболее высоким показателем среди исследуемых материалов.

Воздухововлекающая добавка АЭРОМИКС, выпускаемая ОАО «Пигмент» (г. Тамбов) по ТУ 5745-001-04230553-2016 [143], представляет собой специализированную добавку для бетонов и строительных растворов на основе поверхностно-активных веществ с контролируемым воздухововлекающим действием. АЭРОМИКС – это водный раствор композиции органических соединений, часто с преобладанием анионных или смешанных ПАВ, предназначенный для эффективного стабилизированного вовлечения воздушных пор микронного диапазона в структуру затворяемой системы.

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

Таблица 2.5 – Технические характеристики воздухововлекающих добавок

Показатель	Полипласт АЭРО 815	Аэропласт	АЭРОМИКС
Внешний вид	Жидкость светло-желтая	Жидкость коричневая	Жидкость темно-коричневая
рН	≥ 6	8 ± 1	6 ± 2
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,99	$\geq 1,15$	$1,11 \pm 0,03$
Содержание хлоридов	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$

Вода для затворения бетонов соответствует ГОСТ 23732-2011 [144]. Окисленность воды не может быть больше 15 мг/л. Количество органических поверхностно-действующих веществ, сахаров и фенолов, содержащихся в воде не

должно быть больше 10 м²/л. Показатель рН не должен быть меньше 4 и более 12,5. Содержание в воде растворимых солей ионов SO₄⁻² не более 2700 м²/л, Cl⁻¹ не более 1200 м²/л, растворимых солей не более 5000 м²/л.

Все материалы удовлетворяют требованиям соответствующих нормативных документов.

2.2. Методы исследований

2.2.1. Методы исследования состава, структуры и свойств сырьевых компонентов

Для анализа химического и минерального состава, а также микроструктуры как исходных компонентов, так и полученных образцов применялись методы рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии.

Фракционный состав материалов определяли с помощью прибора MicroSizer 201 (рисунок 2.2), обеспечивающего разделение частиц размером от 0,2 до 600 мкм на четыре десятка размерных классов.

Изучение микроструктуры полученных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3LMU (рисунок 2.3).



Рисунок 2.2 – Лазерный анализатор частиц – MicroSizer 201



Рисунок 2.3 – Микроскоп TESCAN MIRA 3LMU

Минеральный состав исходного сырья и затвердевшего цементного камня исследовали методом рентгенофазового анализа. Суть метода заключается в регистрации прибором дифракционной картины образца и последующем сопоставлении полученных отраженных сигналов с эталонными параметрами кристаллических фаз. Исследования проводились на рентгено-флуоресцентном

спектрометре ARL 9900 Work Station, оснащенный встроенной дифракционной системой и использующем рентгеновскую трубку с медным анодом (рисунок 2.4).

Изменения в химическом составе композитного материала анализировали методом инфракрасной спектроскопии на ИК-Фурье спектрометре ФСМ-1202 (рисунок 2.5, таблица 2.6).



Рисунок 2.4 – Рентгено-флуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation



Рисунок 2.5 – ИК-Фурье спектрометр ФСМ-1202

Таблица 2.6 – Характеристики ИК-Фурье спектрометра

Технические характеристики	Модель ФСМ-1202	
Спектральный диапазон, см ⁻¹	400-7800	
Спектральное разрешение, см ⁻¹	1,0	0,5
Отношение сигнал/шум (время измерения 1 мин в интервале 2100-2200 см ⁻¹ и разрешении 4 см ⁻¹)	> 20 000	
Минимальное время получения одного полного спектра менее, с	1	
Светоделитель	КВт с покрытием на основе Ge	
Источник излучения	Высокотемпературный металлокерамический	
Детектор	Пироприемник LiTaO ₃	
Размеры кюветного отделения, мм	150×190×170	
Габаритные размеры, мм	520×370×250	
Масса, кг	28	

ИК-Фурье спектрометр ФСМ имеет высокую чувствительность, которая позволяет регистрировать предельно низкие концентрации, а также малые количества вещества.

2.2.2. Методы изучения свойств ячеистобетонных смесей и ячеистого бетона

Термовакuumирование ячеистобетонной смеси проводилось на лабораторной установке, представленной на рисунке 2.6. Для получения

термовакуумированного ячеистого бетона производилась укладка предварительно разогретой до 41°C ячеистобетонной смеси в форму, температура которой составляла 55°C (рисунок 2.7).

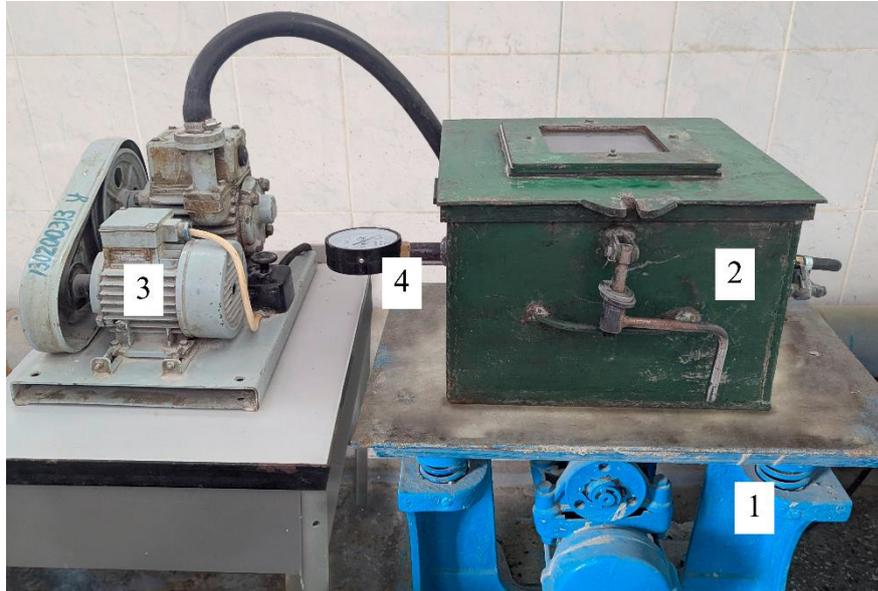


Рисунок 2.6 – Лабораторная установка: 1 – вибростол (удар); 2 – вакуумкамера; 3 – вакуумнасос; 4 – вакуумметр

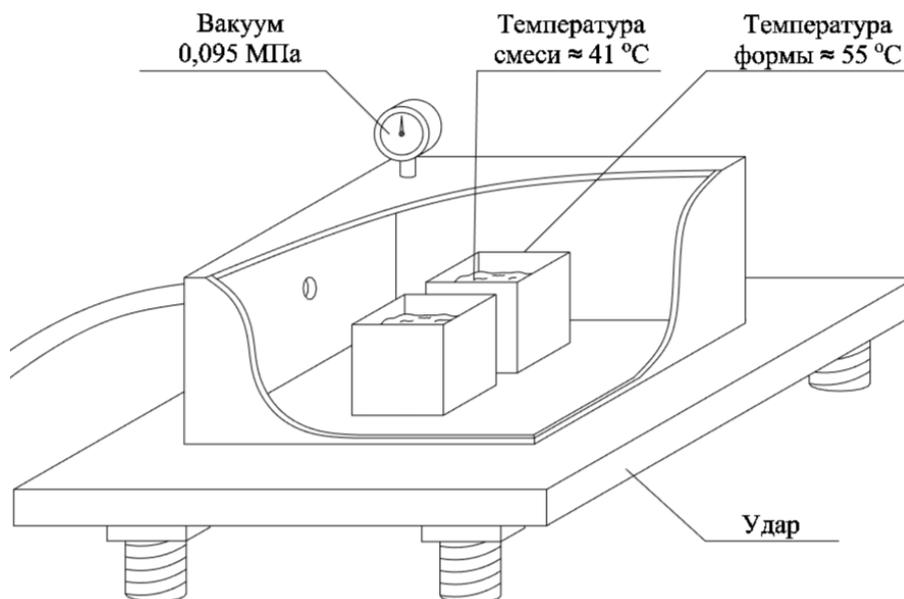


Рисунок 2.7 – Термовакуумирование ячеистобетонной смеси

Форму, заполненную смесью примерно на 60 %, устанавливают в вакуумкамеру, прочно закрепленную на вибростоле, и герметично закрывают. После кратковременных ударов (30 с) до достижения смесью вязко-пластичного состояния одновременно начинают наращивать величину вакуума с помощью вакуумнасоса. Смесь одновременно подвергают удару и вакуумированию до

достижения заданной величины вакуума (0,095 МПа), поддерживая эти условия до получения предварительной прочности формованного изделия.

Определение **нормальной густоты и сроков схватывания** цементного теста осуществляли с применением прибора Вика в соответствии с требованиями ГОСТ 310.3-76 [145].

Для оценки **растекаемости** растворной смеси на стадии испытания готовили объем раствора в 250 см³, который затем заливали в конус до уровня верхнего кольца. После вертикального подъема конуса смесь свободно растекалась по поверхности стекла. Распространение раствора измеряли в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль концентрических окружностей шкалы.

Плотность смеси определяли в соответствии с ГОСТ 10181-2014 [146]. Для этого навеску свежеприготовленной смеси помещали в мерный цилиндрический сосуд по ГОСТ 22685 [147] с известным объемом, уплотняли до полного удаления пустот, срезали излишки смеси кельмой (ГОСТ 58515-2019 [148]), а затем взвешивали сосуд с образцом на лабораторных весах. Массу пустого сосуда вычитали, а плотность рассчитана как отношение массы смеси к ее объему.

Радиус пузырька определяли с использованием высокоскоростной видеорегистрации процесса вспучивания модельного состава; на каждом кадре измеряли текущий радиус пузырька путем калиброванной оценки по масштабной сетке в поле зрения. Значения производных вычисляли численно на основе экспресс-анализа динамики прироста радиуса по временным меткам видеозаписи.

Давление газа внутри пузырька рассчитывали по уравнению Клапейрона-Менделеева для идеального газа с поправкой на поверхностное натяжение по формуле Лапласа:

$$P_r = P_0 + 2\sigma/R, \quad (2.1)$$

где P_0 – внешнее давление, σ – поверхностное натяжение смеси; R – радиус пузырька.

Величину вакуума измеряли с помощью вакуумметра (рисунок 2.6) в вакуумкамере.

Пределное напряжение сдвига определяли с помощью ротационного вискозиметра в соответствии с ГОСТ 25271-93 [149] для вязкой строительной смеси. Проба помещалась в рабочий цилиндр прибора, скорость вращения задавалась по методике для цементных и бетонных растворов, а предел текучести фиксировался как момент начала непрерывного движения рабочей системы, что соответствовало разрушению структуры.

Коэффициент **поверхностного натяжения** смеси измеряли методом кольца Дю Нуи согласно ГОСТ 8.428-81 [150] для жидкостей и тонкодисперсных систем: раствор исследуемой смеси заливали в ячейку, устанавливали платиновое кольцо или пластинку и регистрировали силу отрыва в момент выхода кольца из раствора; по этой величине рассчитывали с учетом корректировочного коэффициента.

Динамическую вязкость смеси определяли ротационным или капиллярным вискозиметром по ГОСТ 25271-93 [149]: навеску тест-микса нагружали при различных скоростях сдвига, а по полученным значениям касательных напряжений и скорости деформации вычисляли динамическую вязкость смеси.

Кинетику газообразования определяли волюмометрическим методом путем измерения объема выделяющегося газа в герметичной системе с последующим сбором газа в градуированные мерные цилиндры. Измерения проводились через равные промежутки времени (1 мин) в течение первых 20 мин реакции, что позволяло рассчитывать скорость газовыделения как отношение объема газа к времени.

Объем вспучивания измеряли путем фиксации изменения высоты поризованной массы в мерных цилиндрах через определенные интервалы времени. Окончательный объем вспучивания рассчитывался как отношение конечного объема смеси после вспучивания к начальному объему, выраженное в процентах.

Капиллярную пористость определяли по ГОСТ 12730.4-2020 [151] путем измерения объема пор, способных насыщаться водой при водопоглощении.

Образцы насыщались водой под вакуумом, а объем насыщенных пор определялся как отношение объема поглощенной воды к общему объему образца.

Воздухосодержание измеряли методом объемного водовытеснения. Данный метод подразумевает расчет объема захваченного воздуха как разницы между теоретическим объемом смеси и фактическим измеренным объемом, что позволяет оценивать степень вовлечения воздуха в смесь.

Стабильность воздушных пор рассчитывали как отношение конечного воздухосодержания к начальному на серии замеров через определенные промежутки времени после введения воздухововлекающих добавок.

Общая пористость определялась методом анализа изображений по способу определения пористости ячеистых бетонов [152], с использованием авторской программы расчета параметров пористости ячеистых бетонов, разработанной на кафедре строительства и городского хозяйства БГТУ им. В.Г. Шухова [153].

Воздушную пористость рассчитывали как разность между общей пористостью, определенной методом анализа изображений, и капиллярной пористостью, отражая долю воздушных пор в структуре бетона.

Гелевую пористость вычисляли как разность между общей пористостью и суммой воздушной и капиллярной пористостей. Этот показатель характеризует объем пор, занятых гелевой фазой цементного камня, и определяется согласно внутренним лабораторным методикам.

2.2.3. Методы исследования физико-механических характеристик термовакуумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения

Основные физико-механические характеристики образцов определялись согласно ГОСТ 25485-2019 [26]. Перед проведением испытаний обязательно измеряли геометрические размеры каждого образца с точностью до 1 мм, что обеспечивало высокую точность последующих расчетов физических параметров и прочностных показателей.

Плотность ячеистобетонной смеси определяли с помощью мерных цилиндров различной вместимости – от 250 до 2000 мл, что позволяло

адаптировать методику под объем доступного образца и требования к точности измерений. Вначале на технических весах с высокой точностью (до 0,01 г) определяли массу пустого и высушенного цилиндра. После этого исследуемую смесь аккуратно заливали в цилиндр до установленного объема и повторно взвешивали заполненный сосуд на тех же весах. Разница между массами до и после заполнения, а также точный объем цилиндра служили исходными данными для вычисления плотности смеси. Расчет плотности выполняли по классической формуле, учитывающей отношение массы смеси к ее объему, что позволяло получить количественную характеристику плотности, важную для оценки качества и однородности ячеистобетонной смеси по формуле:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (2.2)$$

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

Среднюю плотность ячеистого бетона определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 12852.0-2020 [154] и ГОСТ 27005-2014 [155] на образцах-кубах размером $100 \times 100 \times 100$ мм с допуском ± 1 мм, предварительно высушенных до постоянной массы при температуре (105 ± 5) °С по формуле:

$$\rho_{\text{вл}} = \frac{m_{\text{в}}}{V}, \quad (2.3)$$

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

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

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

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

Предел прочности при сжатии определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [156] на испытательной машине МИФ – 600.1.2.С (рисунок 2.8).

Предел прочности при сжатии, МПа, определяли по формуле:

$$R_{сж} = \frac{\alpha k F}{S}, \quad (2.5)$$

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



Рисунок 2.8 – Общий вид машин МИФ – 600.1.2.С

В соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [156], при испытании образцов ячеистого бетона с плотностью от 400 кг/м³ и выше, имеющих стандартные поперечные размеры 100×100×100 мм, применяется поправочный коэффициент α , установленный равным 0,95. Этот коэффициент вводится для корректировки полученных значений прочностных характеристик, учитывая влияние размеров образца на результаты испытаний.

Кроме того, при оценке прочностных показателей ячеистого бетона применяется дополнительный коррекционный коэффициент, который учитывает влажность образца на момент проведения испытаний. В нормативных условиях данный коэффициент принимается равным 1,0, что соответствует уровню содержания влаги в бетоне в пределах 10 % от его массы. Введение этого коэффициента позволяет обеспечить сопоставимость результатов испытаний и адаптировать их к стандартным условиям, учитывая влияние влажности на физико-механические свойства материала.

Водопоглощение определяли по методике ГОСТ 12730.3-2020 [157]. Образцы ячеистого бетона полностью погружают в воду при температуре 20 ± 2 °С так, чтобы слой воды над верхним краем образцов составлял примерно

50 мм. Образцы укладывают на непрочные опоры, обеспечивающие минимальный контакт с дном и стенками емкости. В течение процесса водопоглощения, который продолжается до достижения стабильного веса (разница между двумя последовательными взвешиваниями менее 0,1 %), образцы через каждые 24 ч извлекают и, при использовании обычных весов, слегка протирают от избыточной влаги влажной тканью. Затем фиксируют массу насыщенных водой образцов, включая воду, стекающую с внешней поверхности, и сравнивают ее с массой предварительно высушенных при 105 ± 5 °С образцов. Водопоглощение выражается в виде отношения объема воды, проникшей в поры, к объему образца, что позволяет оценить способность материала удерживать влагу и предсказать его долговечность в условиях влагонасыщения.

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

$$W_M = \frac{m_c - m_b}{m_c} \times 100, \quad (2.6)$$

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

Морозостойкость ячеистого бетона определяли в соответствии с ГОСТ 25485-2019 [26] на серии из 24 кубических образцов размером 100×100×100 мм. Перед началом испытаний образцы насыщали водой в три этапа: первые 8 часов погружали до уровня одной трети высоты образца, затем погружение продолжалось еще 8 ч до уровня двух третей высоты, и, наконец, осуществлялось полное погружение на 24 ч. Такой последовательный режим насыщения обеспечивал полное пропитывание образцов влагой, необходимой для последующего тестирования на морозостойкость.

По завершении стадии насыщения образцы взвешивали, чтобы зафиксировать начальную массу, и далее подвергали циклам замораживания и оттаивания. Замораживание осуществлялось при температуре -18 °С в течение 4 ч, а оттаивание – при комнатной температуре и относительной влажности около 90 % в течение 18 ч. Эти циклы повторялись установленное количество раз,

причем после каждых пяти циклов образцы проверяли на прочность методом сжатия и повторно взвешивали для определения изменения массы. Основной критерий оценки соответствия материалу нормативным требованиям состоял в том, что после определенного числа циклов относительное снижение прочности не должно превышать 15 %, а потеря массы – не более 5 %.

Коэффициент **паропроницаемости** ячеистого бетона определяли по ГОСТ 25898-2020 [158] на образцах ячеистого бетона размерами 100×100×30 мм, выпиленных из ячеистобетонного массива.

Определение **усадки** образцов ячеистого бетона проводилось по ГОСТ 10180-2012 [156] при высыхании образцов в течение длительного времени в естественных условиях, что позволяет более полно представить сложную динамику изменений усадочных деформаций ячеистого бетона в условиях, приближенным к реальным.



Рисунок 2.9 – Прибор для измерения теплопроводности ИТП-МГ4 «100»

Теплопроводность определяли с использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 «100» (рисунок 2.9), который работает в соответствии с ГОСТ 7076-99 [159]. В основе метода лежит пропускание установившегося теплового потока через плоский образец заданной толщины перпендикулярно его лицевым граням с одновременной регистрацией температур на противоположных поверхностях, толщины и плотности теплового потока, позволяющих вычислить коэффициент теплопроводности в заданном температурном интервале.

Для обеспечения воспроизводимости и статистической надежности были подготовлены три прямоугольных параллелепипеда со сторонами рабочих граней 100×100 мм, совместимых с измерительным узлом, а их толщина подбиралась с учетом предполагаемого диапазона теплопроводности материала и рекомендаций руководства по эксплуатации, чтобы обеспечить требуемый градиент температур без паразитных теплотерь по кромкам. Образцы кондиционировали до

стабильного состояния по влажности и температуре, после чего устанавливали между нагревателем и холодильником, создавая фиксированную разность температур, согласованную с паспортным диапазоном прибора и границами допустимых тепловых потоков для исследуемого материала.

В ходе испытаний контролировалась стабилизация теплового режима по критерию постоянства показаний теплового потока и температурных датчиков на горячей и холодной гранях, после чего фиксировались установившиеся значения, а измеренная толщина вводилась в расчет коэффициента теплопроводности. Для исключения влияния краевых эффектов применялись требования по плоскостности и параллельности граней, использовались термоконтактные прокладки или пасты, а также проверялась корректность прижима, исключающая воздушные зазоры на контактах. Результаты по каждому образцу оценивались на предмет разброса; при превышении допустимого предела выполнялась повторная серия измерений с корректировкой ΔT и толщины, чтобы исключить нелинейности, связанные с радиальными утечками тепла или недостижением стационарного режима.

2.3. Выводы

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

2. Методика исследования основана на достижениях фундаментальных и прикладных работ как отечественных, так и зарубежных ученых в области получения ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. Применялся комплекс современных методов с использованием высокотехнологичного оборудования для всестороннего изучения сырья. При определении свойств готовых образцов использовались нормативные документы для обеспечения стандартных показателей.

3. Для разработки термоваккумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения проведено изучение физико-механических и минералогических свойств исследуемых материалов. При этом использовались современные методы и оборудование в полном соответствии с требованиями нормативных документов, что позволило получить достоверные и обоснованные результаты.

3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕРМОВАКУУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

3.1. Фактор избыточного давления – основа формирования пористой структуры

Избыточное давление является определяющим физическим фактором в процессе формирования пористой структуры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавногo твердения. Исследование механизмов воздействия избыточного давления на поризацию ячеистобетонных смесей позволяет установить фундаментальные закономерности структурообразования и совершенствовать технологические параметры производства высокопоризованных композитов с заданными свойствами. Современные научные достижения в области физикохимии дисперсных систем создают теоретическую основу для понимания сложных процессов взаимодействия газовой и жидкой фаз в условиях изменяющегося внешнего давления, что имеет принципиальное значение для развития инновационных технологий ячеистых бетонов.

Фундаментальные основы влияния избыточного давления на процессы поризации базируются на уравнении Рэлея-Плессета, которое описывает динамику роста сферических газовых пузырьков в вязкой среде при воздействии внешнего давления [160]. Классическое уравнение Рэлея-Плессета имеет вид:

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = P_g - P_\infty - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R}, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность окружающей жидкости, то есть массы жидкости в единице объема; R – радиус пузырька, который изменяется во времени; \dot{R} – первая производная радиуса по времени (скорость изменения радиуса); \ddot{R} – вторая производная радиуса по времени (ускорение изменения радиуса); P_g – давление газа внутри пузырька, зависящее от свойств газа и условий среды; P_∞ – внешнее (статическое) давление жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости.

Для условий формирования ячеистого бетона данное уравнение требует модификации с учетом специфических особенностей ячеистобетонных смесей как реологически сложных систем, подверженных структурным изменениям в процессе гидратации вяжущих веществ.

Уравнение Рэлея-Плессета (3.1), описывающее динамику роста сферических газовых пузырьков, адаптированное к вязкоупругой ячеистобетонной смеси, принимает форму (3.2):

$$\rho_{см} \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = P_g - P_{изб} - P_{см} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} - \tau_0, \quad (3.2)$$

где $\rho_{см}$ – плотность смеси; R – радиус пузырька, который изменяется во времени; \dot{R} – первая производная радиуса по времени; \ddot{R} – вторая производная радиуса по времени; P_g – давление газа внутри пузырька, зависящее от свойств газа и условий среды; $P_{изб}$ – избыточное давление над поризуемой смесью; $P_{см}$ – гидростатическое давление смеси; зависящее от ее плотности и высоты столба; τ_0 – предельное напряжение сдвига, характеризующее начальную прочность структуры; σ – коэффициент поверхностного натяжения смеси; μ – динамическая вязкость смеси.

Данное уравнение учитывает влияние избыточного давления как управляющего параметра процесса поризации и позволяет теоретически обосновать рациональные режимы вакуумирования для получения качественной высокопоризованной структуры [160].

Критическое давление начала вспучивания определяется условием $P_{кр} = P_{изб} + P_{см} + \frac{2\sigma}{R} + \tau_0$, при превышении которого давлением газа в поре начинается устойчивый рост пузырьков. Анализ данного соотношения показывает, что снижение избыточного давления $P_{изб}$ за счет создания вакуума над поризуемой смесью является наиболее эффективным способом инициации и поддержания процесса вспучивания даже в высоковязких композициях с пониженным водосодержанием [161].

Процесс роста пузырьков в ячеистобетонной смеси, что соответствует росту объемной доли газовой фазы, удобно рассматривать с уравнением (3.2) в следующем виде:

$$P_{\Gamma} + P_{\Pi} = P_a + P_{см} + \rho_{см} \cdot \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu\dot{R}}{R} + P_{изб}. \quad (3.3)$$

В уравнении (3.3) P_{Γ} и P_{Π} – давление в газовой фазе пузырька соответственно водорода и водяного пара. Давление в жидкой фазе целесообразно представлять в виде суммы атмосферного давления P_a и избыточного давления над смесью $P_{изб}$. В промышленно применяемых технологиях $P_{изб} = 0$, то есть процесс порообразования протекает в смеси при атмосферном давлении.

Гидростатическое давление, создаваемое смесью $P_{см}$:

$$P_{см} = \rho_{см} \cdot g \cdot H, \quad (3.4)$$

где $\rho_{см}$ – плотность смеси для точки A равно 1670 кг/м^3 ; H – высота смеси над пузырьком, м.

Высота смеси над пузырьком определяется размерами оснастки. Парк форм при производстве ячеистого бетона остается неизменным, как и плотность смеси при заданной марке по средней плотности D , в связи с чем гидростатическое давление может быть принято в уравнении (3.3) за постоянную величину.

Давление, обусловленное инерционным сопротивлением смеси $P_{и}$, за счет перемещений фаз:

$$P_{и} = \rho_{см} \cdot \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right). \quad (3.5)$$

Инерционное сопротивление ячеистобетонной смеси определяется преимущественно маркой по средней плотности D и водотвердым отношением. При заданных параметрах производства $P_{и}$ следует считать постоянной величиной уравнения.

Капиллярное давление $P_{к}$:

$$P_{к} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (3.6)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкой фазы в смеси, принимаемое равным величине поверхностного натяжения воды. Капиллярное давление в пузырьке фиксируемого размера величина постоянная.

Давление, вызванное вязкостным сопротивлением смеси P_η :

$$P_\eta = 4 \cdot \eta \cdot \frac{\dot{R}}{R}, \quad (3.7)$$

где η – вязкость ячеистобетонной смеси, величина которой зависит от литевой или ударной технологии, а также добавок.

При принятом способе производства ячеистого бетона для заданных его характеристик вязкостное сопротивление смеси величина вариативная в узких пределах. Поэтому, сумма атмосферного и гидростатического давления, давления за счет инерционного сопротивления, капиллярного давления и давления от вязкостного сопротивления смеси в уравнении (3.3) при развитии модельных представлений приняты за постоянную величину. Тогда, уравнение (3.3) в приложении к технологии ячеистого бетона принимает вид:

$$P_\Gamma + P_\Pi = P_{изб} + C. \quad (3.8)$$

Переместим начало координат на оси давления в точку, соответствующую атмосферному давлению. Тогда вакууму отвечает отрезок от нуля до -1. С учетом уравнения для идеальных газов $PV = RT$ объем пузырьков в ячеистобетонной смеси опишем уравнением:

$$V_p = \frac{k \cdot R \cdot \Delta T_p}{P_{изб} + C}, \quad (3.9)$$

где ΔT_p – прирост температуры газа и водяного пара в пузырьках, К; k – коэффициент пропорциональности; $R = kN_A$ – молярная газовая постоянная, где N_A – постоянная Авогадро; k – постоянная Больцмана; $P_{изб}$ – величина вакуума над смесью $0 > P_{изб} > -1$; $C = P_{см} + P_n + P_K + P_\eta$ при $P_a = 0$.

В полученном уравнении объем пузырьков прямо пропорционален температуре газовой фазы. Вакуум с учетом принятого начала отсчета давления

уменьшает величину знаменателя в уравнении (3.9). Следовательно, термовакуумирование и термовибровакуумирование, согласно (3.9), являются эффективными приемами для существующих заводских технологий ячеистобетонных изделий.

Уравнение позволяет дать качественную оценку процесса вспучивания в условиях динамического воздействия вакуума на заземленный воздух в порах минеральных частиц. При расчете по модифицированному уравнению Рэлея-Плессета необходимо учитывать инерционные эффекты, связанные с ускорением границы пузырька и кинетической энергией движения жидкой фазы.

Для практических расчетов приняты следующие параметры: $\tau_0 = 26$ Па; $\mu = 0,94 \cdot 10^4$ Па·с; $\rho_{см} = 1600$ кг/м³; $\sigma = 0,07$ Н/м; начальный радиус поры $R_0 = 50 \cdot 10^{-6}$ м; давление заземленного воздуха $P_0 = 101,3$ кПа; величина вакуума $P_{изб} = 0,080$ МПа.

При принятых данных расчеты по уравнению (3.2) показывают, что абсолютное давление газа в поре диаметром 0,001 м на глубине 0,1 м при вспучивании смеси с указанными выше параметрами должно быть равно 0,101 (0,088) МПа, а на глубине 0,3 м – 0,120 (0,102) МПа. В скобках приведены значения давления газа для смесей, подвергнутых виброобработке.

Анализ уравнения (3.2) показывает, что максимальное увеличение радиуса поры составляет 2,5 раза (от 50 до 125 мкм), что обеспечивает увеличение объема пор в 15,8 раза. Это значительно превышает показатели традиционной поризации без учета инерционных эффектов.

При использовании удара ($\tau_0 \rightarrow 0$) эффективность процесса дополнительно возрастает, при этом конечный радиус увеличивается до $R_{max} = 135 \cdot 10^{-6}$ м (увеличение в 2,7 раза), а объемное расширение при этом достигает значения 19,7.

Следовательно, применение вакуумного воздействия совместно с ударом может существенно повысить эффективность поризации за счет динамических эффектов расширения заземленного воздуха в порах минеральных частиц. Оптимальный режим характеризуется величиной вакуума 0,055–0,095 МПа и частотой удара 50–80 Гц.

Механизм воздействия избыточного давления на поризацию заключается в создании движущей силы для расширения газовых пор путем нарушения равновесия между внутренним давлением газа и внешними силами сопротивления. В обычных условиях при атмосферном давлении газовые пузырьки в вязкой ячеистобетонной смеси не могут преодолеть совокупное воздействие поверхностного натяжения, вязкостного сопротивления и предельного напряжения сдвига, что ограничивает степень вспучивания и требует повышенного содержания порообразователя. Применение вакуума кардинально изменяет условия поризации, снижая внешнее противодействие и обеспечивая возможность вспучивания смесей с минимальным количеством порообразующих добавок или даже за счет воздуха, адсорбированного минеральными компонентами смеси.

Физико-химические процессы, происходящие при воздействии избыточного давления, характеризуются сложным взаимодействием массообменных и реологических явлений. Диффузия газов из растворенного состояния в газовую фазу пор интенсифицируется при снижении внешнего давления согласно закону Генри, что способствует образованию дополнительных газовых включений и увеличению объема существующих пор. Одновременно происходит изменение реологических характеристик смеси вследствие структурных перестроек в дисперсной системе под воздействием динамических напряжений, возникающих при росте газовых пузырьков.

Кинетика формирования пористой структуры под воздействием избыточного давления определяется соотношением скоростей конкурирующих процессов порообразования и структурообразования (рисунок 3.1). Процесс вспучивания должен протекать таким образом, чтобы в момент интенсивного порообразования смесь обладала достаточными для вспучивания реологическими характеристиками, а к концу порообразования пористая структура фиксировалась за счет сравнительно быстрого возрастания вязкости и предельного напряжения сдвига.

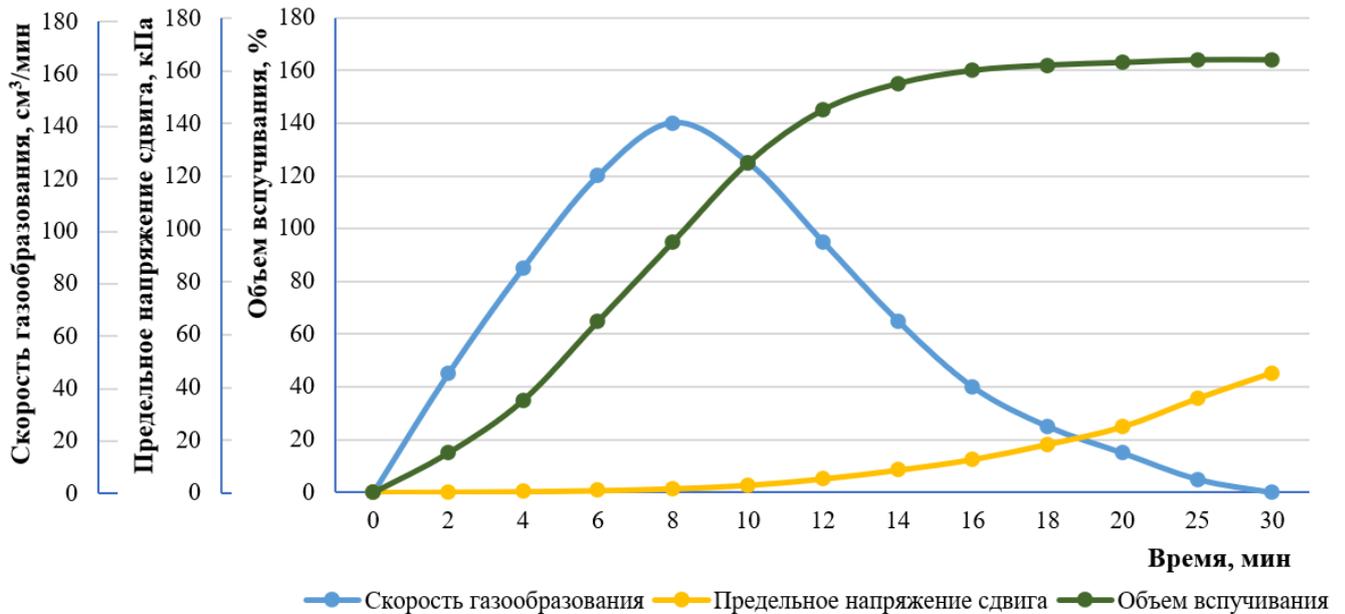


Рисунок 3.1 – Кинетика процессов формирования пористой структуры ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Экспериментальные исследования показывают, что максимальная скорость порообразования наблюдается в первые 5–8 мин процесса, после чего происходит постепенное снижение интенсивности выделения газа на фоне нарастания структурной прочности смеси.

Термодинамические аспекты воздействия избыточного давления связаны с изменением условий фазовых переходов и растворимости газов в жидкой фазе смеси. Снижение величины вакуума приводит к смещению равновесия в сторону газовой фазы, что способствует более полному извлечению растворенных газов и их концентрации в порах. Критическое давление, при котором начинается интенсивная дегазация, зависит от температуры, состава жидкой фазы и присутствия воздухововлекающих добавок, которые снижают поверхностное натяжение и облегчают образование новых газовых пузырьков.

Влияние величины вакуума на эффективность поризации носит нелинейный характер и имеет выраженную область положительного воздействия в диапазоне 0,055–0,095 МПа, что отражено на рисунке 3.2, который иллюстрирует зависимость критического давления вспучивания от величины вакуума при формировании пористой структуры ячеистого бетона.

Согласно рисунку 3.2, можно выделить четыре характерные зоны процесса поризации. I зона (кинетического заторможения поризации) характеризуется величиной вакуума менее 0,04 МПа, при котором не достигается критическое давление для устойчивого роста пор в высоковязких композициях. В данной зоне происходит лишь незначительная активация растворенных газов, однако силы поверхностного натяжения и вязкостного сопротивления превышают движущую силу расширения пор. Результатом является неполное вспучивание и повышенная плотность материала, что проявляется в низких показателях пористости и неоднородной структуре получаемого ячеистого бетона.

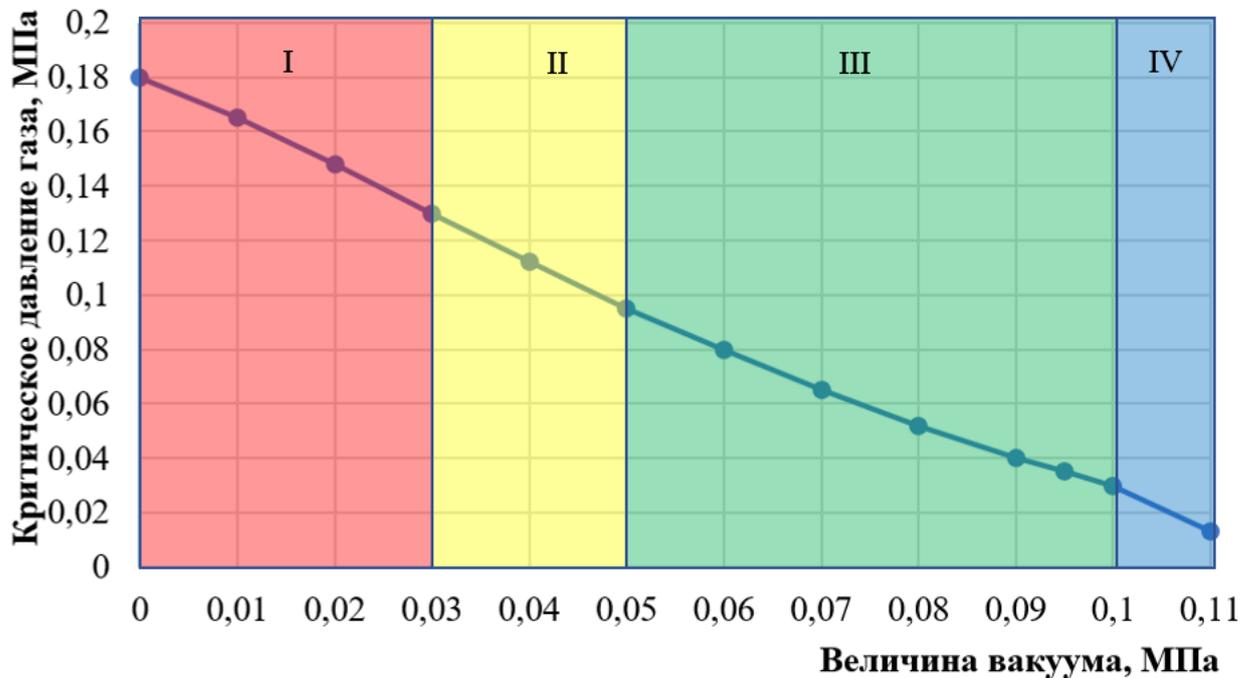


Рисунок 3.2 – Зависимость критического давления вспучивания от величины вакуума при формировании пористой структуры ячеистого бетона: I – зона кинетического заторможения поризации; II – зона индукционного периода поризации; III – зона контролируемой поризации; IV – зона коалесценции пор и критической усадки

II зона (индукционного периода поризации) соответствует диапазону величины вакуума 0,040–0,055 МПа и характеризуется началом активного порообразования. В данной зоне происходит преодоление энергетического барьера зарождения новых пор, инициируется процесс дегазации растворенного воздуха, однако интенсивность поризации остается относительно низкой из-за высокого сопротивления вязкой среды расширению газовых включений.

Индукционный период поризации аналогичен индукционному периоду при твердении цементных систем и характеризуется медленным нарастанием скорости процесса до достижения критического уровня активации.

III зона (контролируемой поризации) охватывает диапазон величины вакуума 0,055–0,095 МПа. В данной зоне обеспечивается максимально эффективное использование потенциала порообразования при сохранении стабильности пористой структуры. Происходит интенсивное и равномерное вспучивание смеси с образованием сферических однородных пор, при этом скорость роста пор согласована со скоростью нарастания структурной прочности смеси. Контролируемая поризация характеризуется устойчивым ростом газовых пузырьков без коалесценции и обеспечивает формирование высококачественной ячеистой структуры с равномерным распределением пор по размерам.

IV зона (коалесценции пор и критической усадки) соответствует избыточному вакуумированию (свыше 0,095 МПа) и характеризуется нарушением стабильности пористой структуры из-за слишком интенсивного порообразования, опережающего процесс структурообразования. В данной зоне происходит слияние соседних пор (коалесценция), образование крупных неправильных пустот, разрушение межпоровых перегородок и критическая усадка структуры. Избыточная интенсивность вакуумного воздействия приводит к нарушению баланса между скоростью порообразования и скоростью фиксации структуры, что приводит к ухудшению качества ячеистой структуры и снижению прочностных характеристик материала.

Характеристики ячеистобетонной смеси существенно влияют на эффективность воздействия избыточного давления (рисунок 3.3). Смеси с низким водотвердым отношением ($V/T = 0,30–0,40$) обладают повышенной вязкостью и предельным напряжением сдвига, что затрудняет процесс вспучивания при нормальном атмосферном давлении. Применение вакуума позволяет успешно поризовать такие композиции, обеспечивая формирование качественной

структуры с улучшенными физико-механическими свойствами за счет пониженного водосодержания.

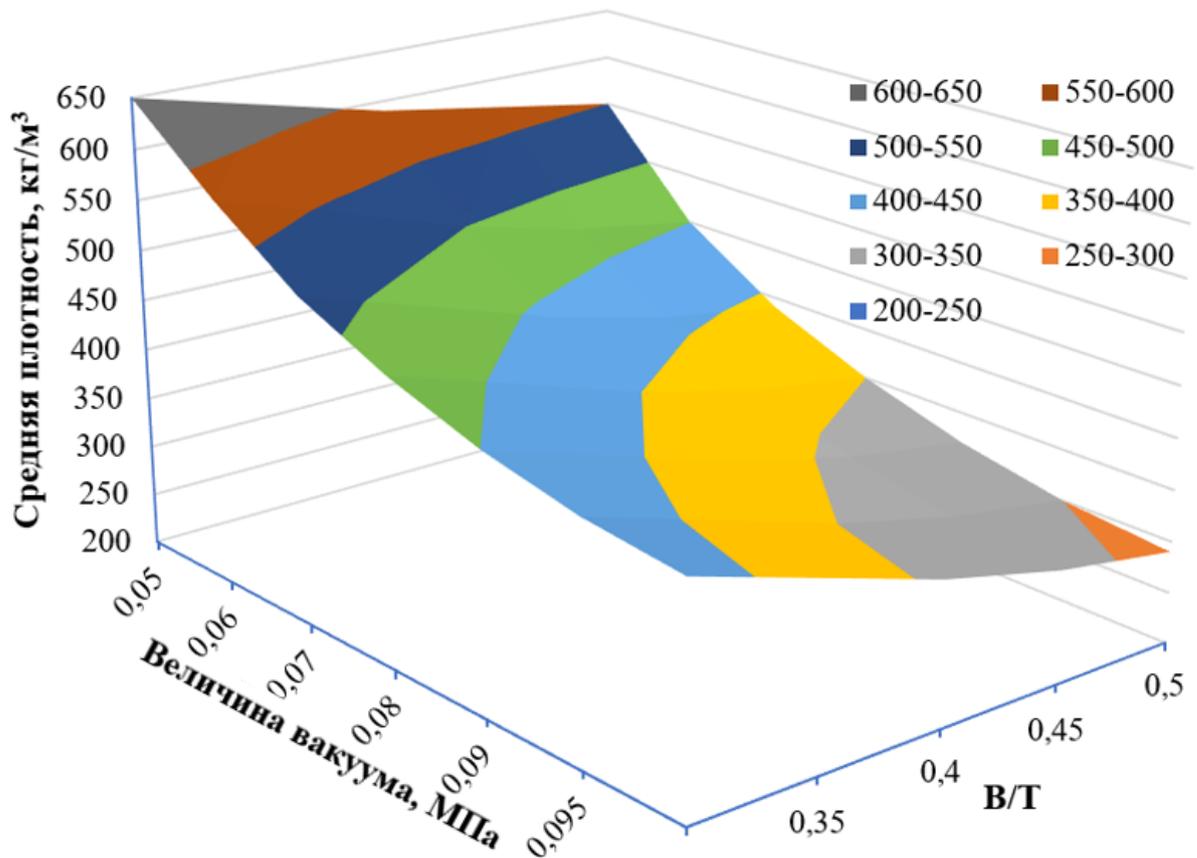


Рисунок 3.3 – Влияние величины вакуума и водотвердого отношения на среднюю плотность ячеистого бетона

Молекулярно-кинетические процессы диффузии газов в поровом пространстве ячеистобетонной смеси существенно активизируются при снижении внешнего давления. Коэффициент диффузии газов в поровой структуре увеличивается обратно пропорционально давлению, что способствует более эффективному массопереносу и равномерному распределению газовой фазы. Диффузионные процессы играют особенно важную роль на поздних стадиях формирования структуры, когда основное газообразование уже завершилось, но продолжается перераспределение газа между порами различного размера.

Влияние вакуумирования на формирование микроструктуры межпоровых перегородок связано с изменением условий гидратации вяжущих веществ в условиях пониженного давления. Ускорение дегазации смеси способствует более

полному удалению воздуха из капиллярных пор цементного камня, что приводит к повышению плотности и прочности межпоровых перегородок. Одновременно снижение давления может влиять на кинетику образования гидратных фаз, изменяя морфологию кристаллических новообразований и их взаимное расположение в структуре твердеющего материала.

Стабилизация пористой структуры при вакуумировании достигается за счет сочетания физико-химических и механических факторов. Критический момент фиксации структуры наступает при достижении предельного напряжения сдвига величиной 8–12 кПа, когда смесь теряет способность к дальнейшему вспучиванию, но сохраняет достаточную пластичность для предотвращения разрушения пор. Процесс стабилизации сопровождается постепенным выравниванием давления газа в порах с внешним давлением и переходом к режиму медленной диффузионной релаксации системы.

Технологические аспекты вакуумирования включают выбор момента начала вакуумирования, продолжительности воздействия и режима изменения давления. Начало вакуумирования должно совпадать с моментом достижения смесью требуемых реологических характеристик, обычно через 2–4 мин после окончания перемешивания компонентов. Продолжительность вакуумного воздействия определяется кинетикой структурообразования и составляет 8–15 мин для большинства составов ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.

Энергетические аспекты процесса поризации при вакуумировании связаны с минимизацией поверхностной энергии системы путем формирования сферических пор с минимальным отношением поверхности к объему. Поверхностное натяжение на границе раздела газ-жидкость стремится к минимуму, что обуславливает естественное формирование сферических пор и их равномерное распределение в объеме смеси. Энергия, затрачиваемая на создание новой поверхности при росте пор, компенсируется работой расширения газа при снижении внешнего давления.

Моделирование процессов поризации на основе модифицированного уравнения Рэля-Плессета (3.2) позволяет прогнозировать параметры технологии

и свойства получаемых материалов. Численное решение дифференциального уравнения с учетом изменяющихся во времени реологических свойств смеси дает возможность определить кинетику роста пор, время достижения максимального расширения и момент фиксации структуры. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и могут использоваться для рационализации составов и технологических режимов производства ячеистых бетонов.

Перспективные направления развития технологий с использованием избыточного давления включают разработку автоматизированных систем управления процессом поризации с обратной связью по параметрам структурообразования. Применение современных методов мониторинга реологических свойств смеси в реальном времени позволяет установить режимы вакуумирования для каждого конкретного состава и обеспечивать стабильное качество выпускаемой продукции. Интеграция физико-химических моделей процесса с системами автоматического управления открывает возможности для создания высокоэффективных производственных комплексов нового поколения.

Таким образом, фактор избыточного давления является фундаментальной основой формирования пористой структуры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавногo твердения. Теоретическое обоснование механизмов воздействия на основе уравнения Рэлея-Плессета, адаптированного к ячеистобетонной смеси, экспериментальное определение параметров процесса и разработка эффективных технологических решений создают научно-техническую базу для производства высококачественных ячеистых материалов с заданными характеристиками плотности, прочности и долговечности.

3.2. Влияние температурного фактора на формирование ячеистого бетона

Влияние температурного фактора на формирование ячеистого бетона выражается в нелинейном влиянии температуры на скорость гидратации цемента, кинетику газообразования, набор прочности и капиллярную пористость поризуемых смесей. Тепловой режим является одним из ключевых элементов

технологии неавтоклавного твердения термоваккумированного ячеистого бетона, поскольку именно температура определяет не только развитие внутренней структуры материала, но и его итоговые прочностные, теплофизические и долговечные характеристики.

Температура непосредственно управляет скоростью гидратации цемента – главного процесса, ответственного за связность и стабильность структуры материала. С ростом температуры интенсивность гидратационных реакций возрастает по экспоненциальному закону, что хорошо отражается формулой Аррениуса:

$$k=Ae^{-E_a/RT}, \quad (3.10)$$

где k – скорость химической реакции; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; A – частота столкновений.

Для цементных систем интенсивный рост скорости гидратации начинается с 30 °С и достигает максимума при 40–43 °С (рисунок 3.4), что позволяет существенно ускорить формирование прочной стеночной структуры вокруг пор.

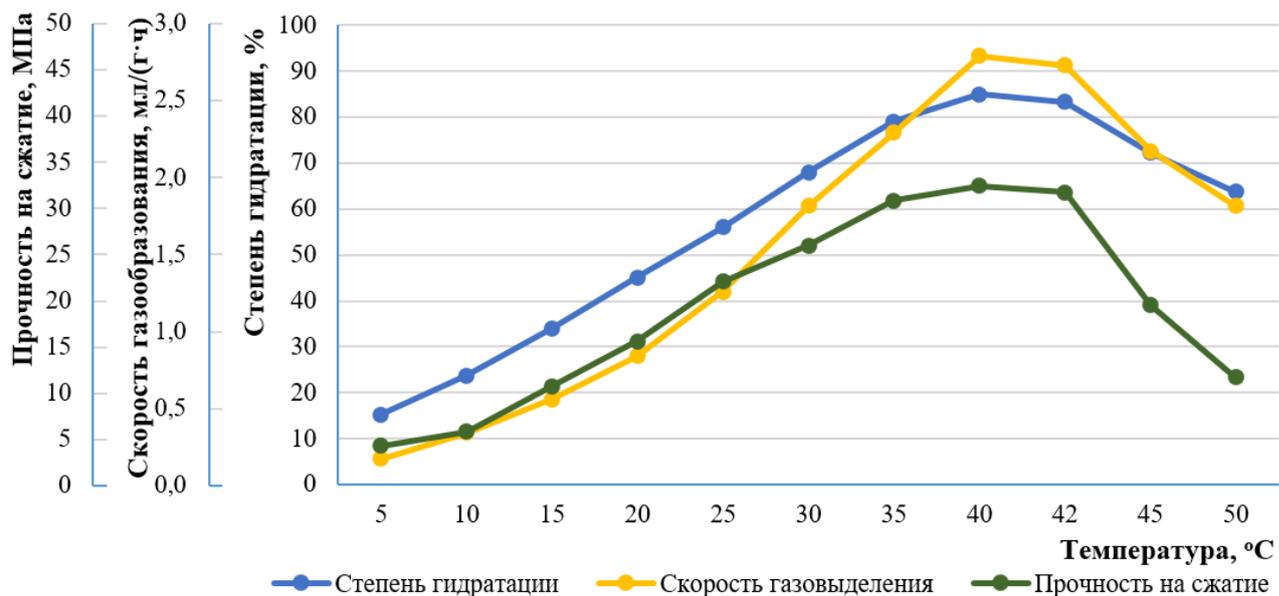


Рисунок 3.4 – Зависимость степени гидратации, скорости газообразования и темпа набора прочности неавтоклавного ячеистого бетона от температуры

Экспериментальные исследования показывают, что при нагреве смеси до 39–43 °С степень гидратации за первые сутки достигает 97–100 % от максимально

возможного значения, скорость газообразования максимальна и достигает 1,0 условных единиц, а темп набора прочности выходит на максимум. При дальнейшем росте температуры выше 45 °С гидратационные процессы замедляются из-за ускоренного испарения воды и возможного теплового растрескивания, а также увеличения капиллярной пористости, что ухудшает структуру материала. При пониженных температурах (ниже 20 °С) скорость гидратации и газообразования резко падает, что приводит к значительному замедлению набора прочности и риску смещения газообразования за пределы «окна» структурообразования.

Показательно, что нелинейность температурного влияния проявляется во всех ключевых процессах: максимальное соотношение между степенью гидратации, скоростью газогенерации и механикой набора прочности приходится на область 39–43 °С, которую следует рекомендовать для термовакuumного формирования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.

Температурно-временная зависимость набора прочности свидетельствует, что повышение температуры твердения до 40–42 °С позволяет достичь 100–115 % проектной прочности уже на 14–21 сут, тогда как при температуре 10 °С этот показатель не превышает 85 % за 28 сут (рисунок 3.5).

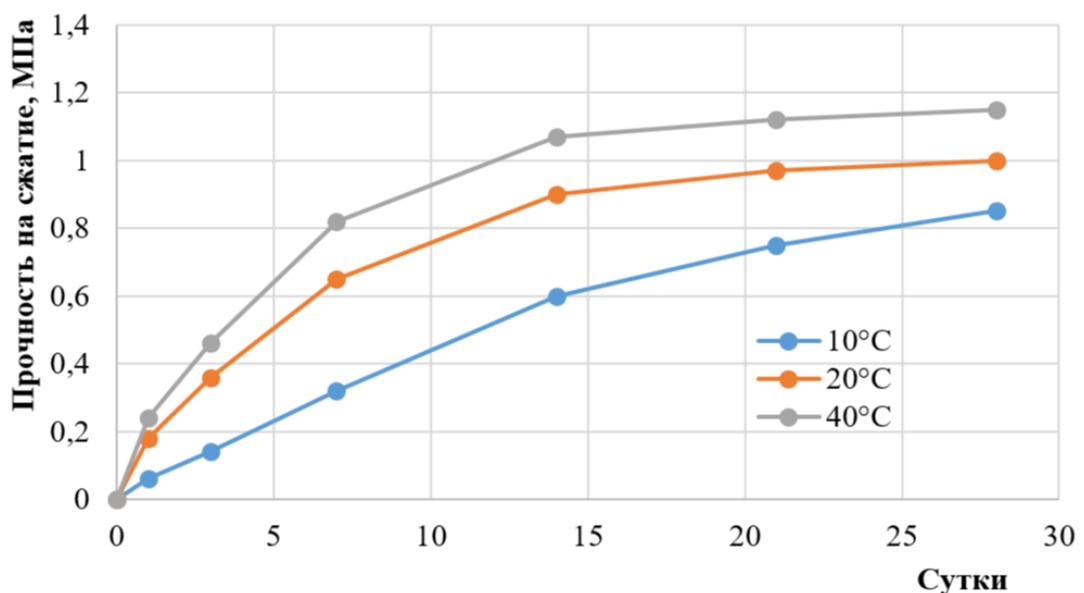


Рисунок 3.5 – Кинетика набора прочности неавтоклавного ячеистого бетона при разных температурах за 28 сут

Практические технологические режимы фиксируют необходимость доведения смеси до температуры 40–42 °С непосредственно перед началом поризации и вакуумного воздействия, что описано в разработанном способе изготовления ячеистобетонных изделий (приложение А) [162]. При этой температуре смесь сохраняет достаточную мобильность для реализации пузырей через вязкую фазу, но уже обладает возрастающей склонностью к структурообразованию, обеспечивая «фиксацию» новой ячеистой структуры. Снижение или повышение температуры относительно этого диапазона приводит либо к резкому удлинению сроков твердения, либо к ухудшению структуры и возникновению термических пороков, связанных с избыточной усадкой и повышенной капиллярной пористостью.

Корреляция между температурой твердения, расходом воды и капиллярной пористостью смеси показывает, что повышение температуры ускоряет процесс сушки и уменьшает расход воды до определенного предела (рисунок 3.6), но уже при 50 °С вновь наблюдается рост остаточной пористости и дефективности структуры из-за ускоренного твердения и образования новых капиллярных пор (от 26 % при 40 °С до 31 % при 50 °С). Именно поэтому выдержка бетона при температуре выше 43–45 °С без дополнительного увлажняющего контроля может приводить к образованию микротрещин и ухудшению долговечности готовых изделий.

В температурном диапазоне 35–45 °С образуются наиболее совершенные межпоровые перегородки, обладающие максимальной плотностью и минимальной проницаемостью. Длительное прогревание при этих температурах улучшает сцепление между фрагментами структуры, снижает процент капиллярной пористости, а также минимизирует риск усадочных трещин, поскольку прирост прочности осуществляется более равномерно по объему материала. Микроскопические наблюдения показывают, что при требуемых температурах большинство пор замкнутые, сферические, размер 0,7–1,4 мм. При температурах выше 50 °С начинается разрушение цементного каркаса,

формирование выглаженных межпоровых зон и частичное объединение отдельных пустот, что ведет к ухудшению прочности и теплоизоляционных характеристик.

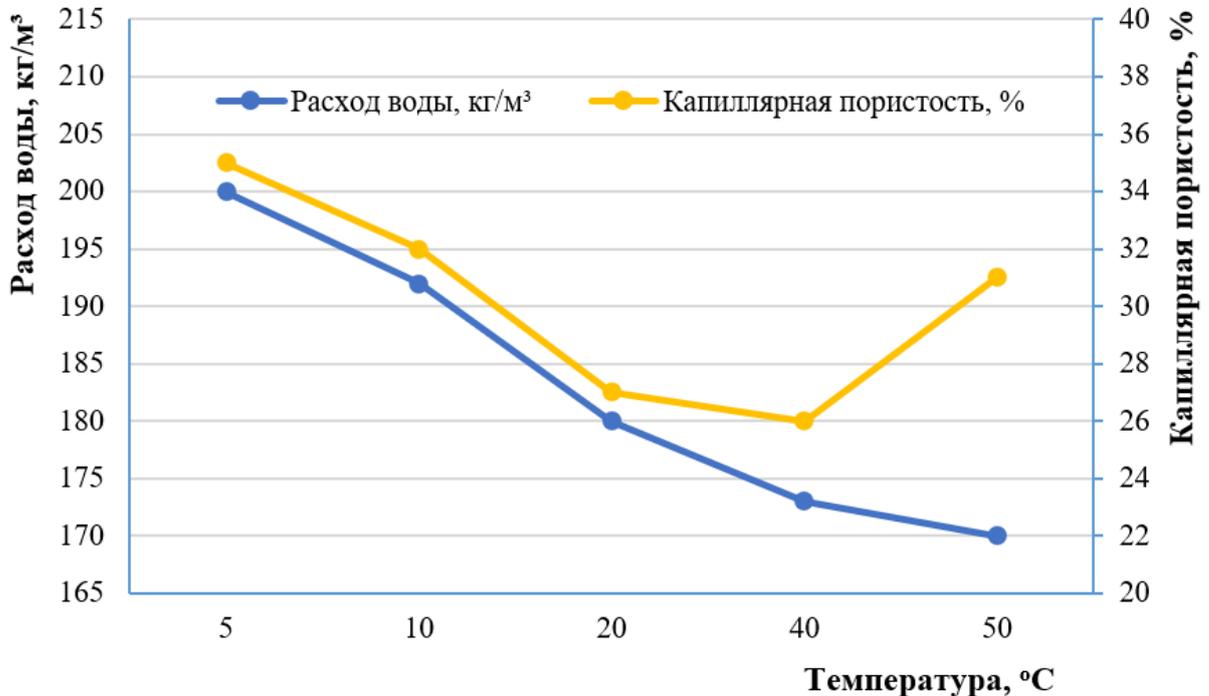


Рисунок 3.6 – Зависимость температуры, расхода воды и капиллярной пористости в процессе твердения неавтоклавного ячеистого бетона

Для точного контроля процесса твердения и структуры ячеистого бетона применяется коэффициент температурной эффективности формирования пор:

$$\eta_T = \frac{\Delta V_p(\Delta T)}{\Delta t \cdot V_{total}}, \quad (3.11)$$

где ΔV_p – нарастающий объем пор в течение температурного интервала ΔT ; Δt – время стадии интенсивной поризации; V_{total} – общий объем отвердевшей смеси.

Максимум этого коэффициента достигается при 39–43 °C, что еще раз указывает на уникальность данного температурного коридора в технологии высококачественных ячеистых материалов.

Термовакuumная обработка в рассматриваемых температурных диапазонах оказывает двойственное действие: с одной стороны, ускоряется выделение растворенных и физически связанных газов, а с другой – уменьшается риск их

преждевременного выхода при снижении вязкости до «критического минимума». В итоге это способствует получению равномерного распределения пор по всему объему и предотвращает образование макрокапилляров и сквозных каналов.

Таким образом, температурный фактор оказывает фундаментальное влияние на всю цепочку процессов поризации, структурообразования и физико-химического становления термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона. Реализация строго контролируемого температурного режима в интервале 39–43 °С – необходимое и достаточное условие получения композитных изделий с заданными эксплуатационными характеристиками: низкой плотностью, высокой прочностью, однородной структурой и повышенной долговечностью.

3.3. Исследование влияния воздухововлекающих добавок на формирование пористой структуры ячеистых бетонов

Воздухововлекающие добавки представляют собой специализированную группу веществ, играющих определяющую роль в формировании контролируемой пористой структуры ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. В отличие от обычных бетонов, где воздухововлечение носит вспомогательный характер для повышения морозостойкости, в ячеистых бетонах данные добавки выступают как структурообразующий компонент, непосредственно определяющий основные физико-механические и эксплуатационные свойства материала. Механизм действия воздухововлекающих добавок основан на снижении поверхностного натяжения жидкой фазы смеси и стабилизации воздушных включений за счет формирования адсорбционных слоев воздухововлекающих добавок на границе раздела фаз «газ – жидкость». Молекулы воздухововлекающих добавок, имеющие дифильную структуру с гидрофильной полярной головкой и гидрофобным углеводородным радикалом, ориентируются на межфазной поверхности таким образом, что полярные группы направлены в водную фазу, а неполярные – в газовую, создавая стабилизирующую оболочку вокруг воздушных пузырьков.

Фундаментальные принципы воздухововлечения в цементных системах базируются на теории поверхностных явлений и коллоидной химии. Воздухововлекающие добавки представляют собой дифильные молекулы, содержащие гидрофильную полярную головку и гидрофобный углеводородный радикал. При введении в водно-цементную систему эти молекулы концентрируются на границе раздела фаз «воздух – жидкость», снижая поверхностное натяжение и стабилизируя воздушные пузырьки против коалесценции. Механизм стабилизации осуществляется через формирование адсорбционных слоев на поверхности воздушных включений, где молекулы воздухововлекающих добавок ориентируются полярными группами в сторону водной фазы, а неполярными – в сторону газовой фазы, создавая своеобразный «молекулярный частокол». Это приводит к возникновению электростатического отталкивания между одноименно заряженными пузырьками, предотвращая их слипание и обеспечивая долговременную устойчивость пенной структуры.

Термодинамические аспекты воздухововлечения описываются уравнением Гиббса для адсорбции на межфазной поверхности:

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \frac{\Delta\sigma}{\Delta C}, \quad (3.12)$$

где Γ – поверхностная концентрация воздухововлекающих добавок; C – объемная концентрация; σ – поверхностное натяжение; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Максимальная эффективность воздухововлечения достигается при концентрациях, близких к критической концентрации мицеллообразования (ККМ), когда поверхность раздела фаз насыщается молекулами воздухововлекающих добавок, а дальнейшее увеличение концентрации приводит к образованию мицелл в объеме раствора.

Кинетика адсорбции воздухововлекающих добавок на границе раздела фаз подчиняется модифицированному уравнению Ленгмюра с учетом межмолекулярных взаимодействий:

$$\Gamma = \Gamma_{max(KC)} / (1 + KC + \alpha C^2), \quad (3.13)$$

где K – константа адсорбции, α – коэффициент латерального взаимодействия адсорбированных молекул; Γ_{max} – максимальная концентрация воздухововлекающих добавок.

Высокие значения константы адсорбции обеспечивают быструю и прочную фиксацию молекул воздухововлекающих добавок на поверхности воздушных пузырьков, что критично для сохранения пористой структуры в процессе схватывания и твердения цементного камня.

Для исследования эффективности различных типов воздухововлекающих добавок был проведен комплексный анализ трех представителей различных классов по активному веществу: АЭРОМИКС на основе лигносульфонатов, Полипласт АЭРО 815 на основе водного раствора смоляной кислоты природного происхождения, и Аэропласт на основе модифицированных полиметиленафталинсульфонатов. Выбор данных добавок обусловлен тем, что они представляют различные классы веществ и имеют различные механизмы стабилизации воздушных включений.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с разработанной программой, включающей определение дозировок добавок путем варьирования их содержания в диапазоне 0,05–0,6 % от массы цемента, исследование воздуходержания смесей компрессионным методом, оценку стабильности пенной структуры визуальным методом с фиксацией времени сохранения 50 % исходного объема пены, микроскопический анализ морфологии пор в затвердевшем материале. Результаты исследования воздуходержания представлены на рисунке 3.7.

Экспериментальные исследования показывают, что зависимость воздуходержания от дозировки имеет сложный нелинейный характер, специфический для каждого типа воздухововлекающей добавки. Полипласт АЭРО 815 демонстрирует устойчивый рост воздуходержания с увеличением дозировки, достигая максимального значения 11,2 % при содержании 0,4 % от

массы цемента. При дозировке 0,05 % воздухосодержание составляет 2,8 %, при 0,1 % – 4,5 %, при 0,2 % – 6,8 %, при 0,3 % – 9,5 %, при дальнейшем увеличении до 0,5 % и 0,6 % наблюдается стабилизация на уровне 10,5–10,8 %. Такая зависимость указывает на эффективную адсорбцию молекул смоляных кислот на границе раздела фаз и формирование стабильных адсорбционных слоев, препятствующих коалесценции воздушных пузырьков даже при высоких концентрациях воздухововлекающих добавок в растворе.

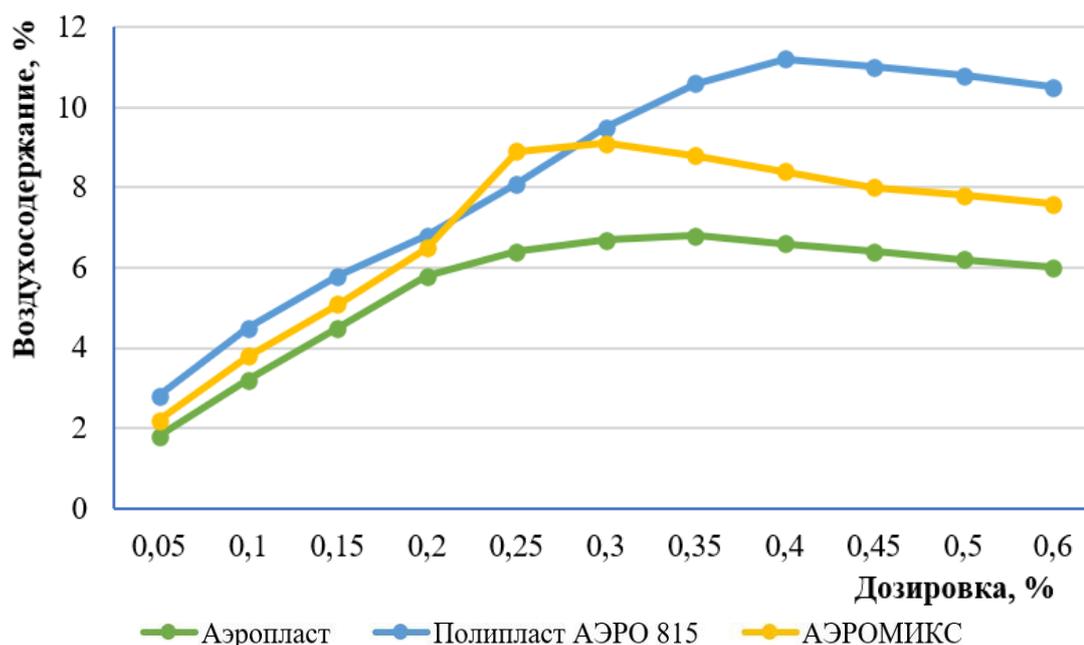


Рисунок 3.7 – Зависимость воздухосодержания от концентрации воздухововлекающих добавок

Воздухововлекающая добавка АЭРОМИКС показывает иную кинетику воздухововлечения с достижением максимального эффекта при дозировке 0,25–0,3 % и воздухосодержанием 8,7–9,1 %. При дозировке 0,05 % воздухосодержание составляет 2,2 %, при 0,1 % – 3,8 %, при 0,2 % – 6,5 %, при превышении указанной дозировки наблюдается снижение эффективности до 8,2 % при 0,4 % и 7,6 % при 0,6 % добавки. Такое поведение характерно для синтетических воздухововлекающих добавок с выраженной ККМ, превышение которой приводит к снижению концентрации активных мономеров на межфазной поверхности.

Воздухововлекающая добавка Аэропласт обеспечивает наименьшее воздухосодержание во всем исследованном диапазоне дозировок с максимальным

значением 6,8 % при дозировке 0,15–0,2 % от массы цемента. При дозировке 0,05 % воздухосодержание составляет 1,8 %, при 0,1 % – 3,2 %, при 0,3 % и выше наблюдается стабилизация на уровне 6,2–6,5 %. Относительно низкая эффективность обусловлена высокой молекулярной массой и сложной пространственной структурой молекул нафталинсульфонатов, затрудняющей их ориентацию на межфазной поверхности и снижающей поверхностную активность.

Поверхностное натяжение является основным параметром, определяющим эффективность воздухововлекающего действия воздухововлекающих добавок. Исследование зависимости поверхностного натяжения от концентрации добавок показывает характерные особенности каждого типа воздухововлекающих добавок (рисунок 3.8).

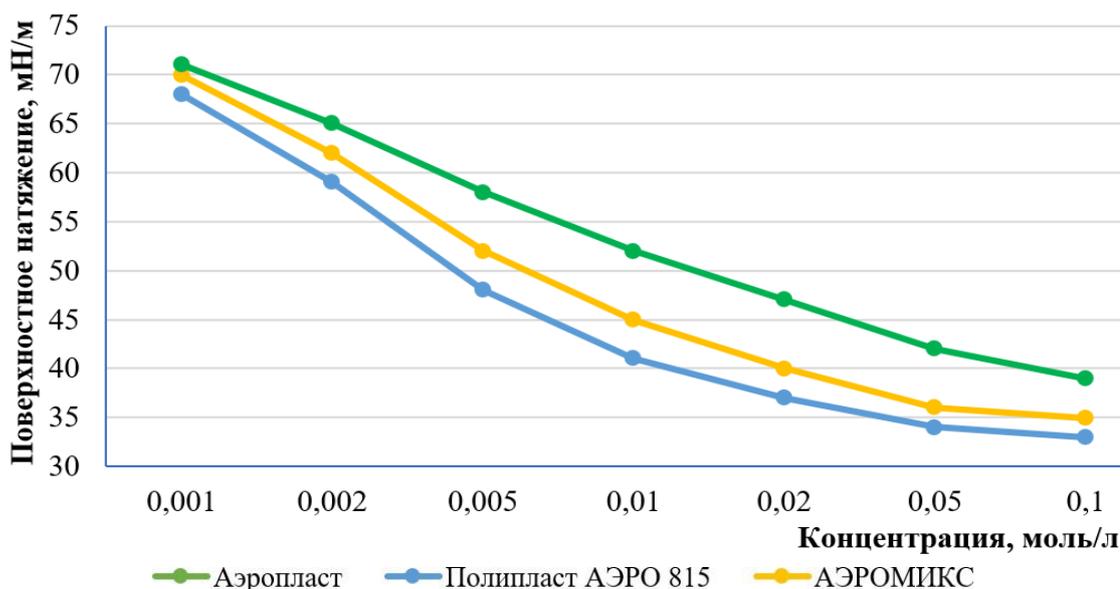


Рисунок 3.8 – Зависимость поверхностного натяжения от концентрации воздухововлекающих добавок

Воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815 на основе природных смоляных кислот демонстрирует наиболее эффективное снижение поверхностного натяжения, достигая минимального значения 33 мН/м при концентрации 0,1 моль/л. ККМ составляет $1,4 \cdot 10^{-3}$ моль/л, что обеспечивает высокую поверхностную активность при относительно низких концентрациях в растворе. АЭРОМИКС показывает промежуточные значения с минимальным поверхностным натяжением 35 мН/м и ККМ $1,1 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Аэропласт

характеризуется наименьшей поверхностной активностью с минимальным натяжением 39 мН/м и ККМ $2,3 \cdot 10^{-3}$ моль/л, что объясняет его пониженную эффективность в воздухоовлечении.

Морфологический анализ воздушных включений в затвердевшем ячеистом бетоне проводился с использованием оптической микроскопии и цифровой обработки изображений для определения размерного распределения пор, коэффициента сферичности и степени связанности пористой структуры (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Морфологические характеристики пористой структуры

Показатель	Воздухововлекающие добавки		
	Полипласт АЭРО 815	АЭРОМИКС	Аэропласт
Размерный диапазон пор, мкм			
<20	35	28	22
20-50	32	29	25
50-100	23	26	28
>100	10	17	25
Средний диаметр пор, мкм	52	68	85
Коэффициент сферичности	0,91	0,86	0,82
Коэффициент связанности пор	0,12	0,19	0,28

Воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815 при дозировке 0,40 % обеспечивает формирование высокооднородной системы воздушных включений со следующим размерным распределением: поры диаметром менее 20 мкм составляют 35 % общего объема пористости, 20–50 мкм – 32 %, 50–100 мкм – 23 %, свыше 100 мкм – 10 %. Средний диаметр пор составляет 52 мкм, коэффициент сферичности достигает 0,91, что указывает на близость формы воздушных включений к идеальной сферической и высокое качество пенной структуры.

Распределение пор по размерам при использовании Полипласт АЭРО 815 характеризуется узким максимумом в диапазоне 30–60 мкм, что позволяет обеспечить высокие теплоизоляционные свойства при сохранении достаточной механической прочности межпоровых перегородок. Доля капиллярных пор диаметром менее 10 мкм составляет не более 8 %, что минимизирует капиллярный транспорт влаги и повышает долговечность материала. Практически все

воздушные включения имеют замкнутый характер с коэффициентом связанности менее 0,15, что обеспечивает эффективную теплоизоляцию и предотвращает конвективный теплоперенос через пористую структуру.

Воздухововлекающая добавка АЭРОМИКС при установленной дозировке 0,25 % формирует менее однородную пористую структуру с более широким размерным распределением: поры диаметром менее 20 мкм составляют 28 % объема, 20–50 мкм – 29 %, 50–100 мкм – 26 %, свыше 100 мкм – 17 %. Средний диаметр пор увеличивается до 68 мкм, коэффициент сферичности снижается до 0,86, что указывает на менее качественную стабилизацию воздушных включений и повышенную склонность к деформации пор в процессе твердения цементной матрицы.

Воздухововлекающая добавка Аэропласт при дозировке 0,15 % обеспечивает наименее равномерную структуру с преобладанием крупных пор: диаметром менее 20 мкм – 22 %, 20–50 мкм – 25 %, 50–100 мкм – 28 %, свыше 100 мкм – 25 %. Средний диаметр пор достигает 85 мкм, коэффициент сферичности составляет 0,82. Высокая доля крупных пор негативно влияет на теплоизоляционные свойства и механическую прочность материала, а пониженная сферичность указывает на неустойчивость пенной структуры в процессе формования и твердения.

Влияние воздухововлекающих добавок на реологические характеристики цементных суспензий исследовалось с использованием ротационной вискозиметрии в диапазоне скоростей сдвига 1-1000 с⁻¹, что представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Влияние добавок на реологические свойства цементной суспензии

Показатель	Полипласт АЭРО 815	АЭРОМИКС	Аэропласт
Динамическая вязкость, Па·с	38	32	28
Предельное напряжение сдвига, Па	6,2	4,8	3,5
Время истечения, с	28	24	21
Растекаемость по конусу, см	22	25	28

Воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815 оказывает умеренное пластифицирующее действие, снижая динамическую вязкость цементного теста с водоцементным отношением 0,4 с 45 до 38 Па·с при скорости сдвига 100 с^{-1} . Одновременно наблюдается снижение предельного напряжения сдвига с 8,5 до 6,2 Па, что улучшает удобоукладываемость смеси и способствует более равномерному распределению воздушных включений в объеме материала.

Температурная стабильность воздухововлекающих добавок исследовалась в диапазоне температур от 5 до 50 °С с оценкой сохранения воздухововлекающих свойств при различных термических режимах и представлена на рисунке 3.9.

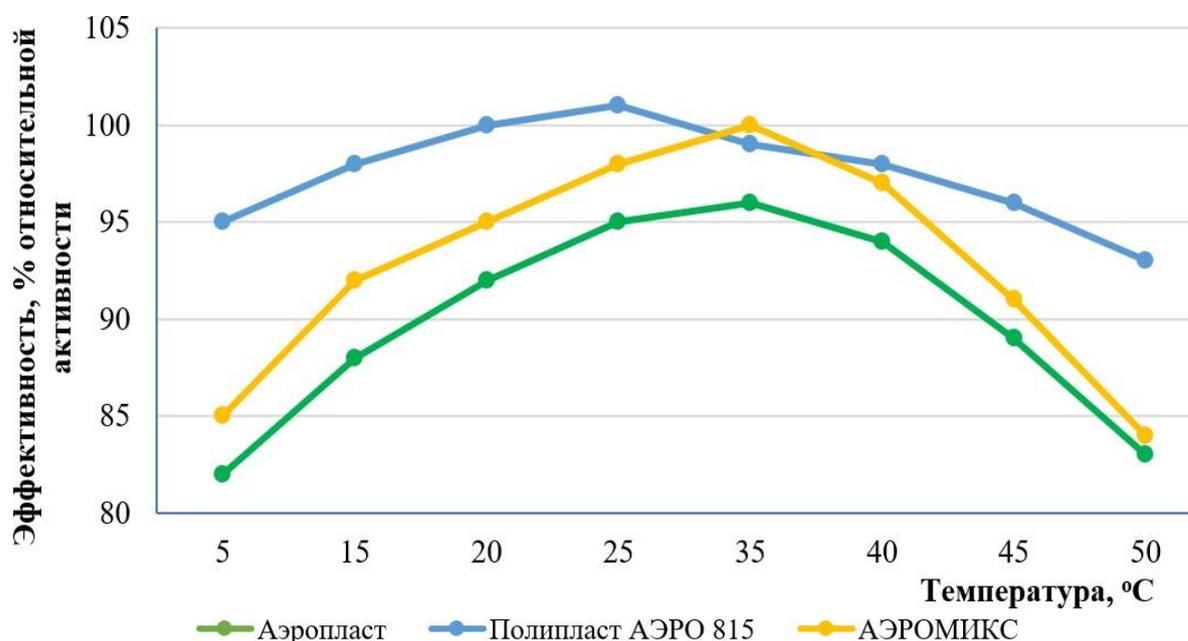


Рисунок 3.9 – Влияние температуры на эффективность воздухововлекающих добавок

Воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815 демонстрирует высокую термостабильность с сохранением 94–96 % исходной активности при температуре 5 °С, 100 % при 20 °С, 98–99 % при 35 °С и 92–94 % при 50 °С. Устойчивость к температурным воздействиям обеспечивается жесткой молекулярной структурой смоляных кислот и прочностью адсорбционных слоев на межфазных поверхностях.

Кинетика воздухововлечения при различных температурах показывает, что повышение температуры до 35–40 °С ускоряет процессы адсорбции и диффузии воздухововлекающих добавок, что приводит к более быстрому установлению

равновесной структуры пены и повышению общей эффективности воздухововлекающего действия. Дальнейшее повышение температуры вызывает увеличение растворимости газов в жидкой фазе и усиление теплового движения молекул, что может негативно влиять на стабильность воздушных включений.

Механизм пластифицирующего действия смоляных кислот связан с их адсорбцией на поверхности частиц цемента с образованием мономолекулярных слоев, снижающих межчастичное трение и облегчающих относительное перемещение твердых частиц в суспензии. Карбоксильные группы абиетиновой кислоты взаимодействуют с положительно заряженными центрами на поверхности цементных зерен, создавая электростатическое отталкивание и предотвращая флокуляцию частиц. Гидрофобные фрагменты молекул ориентируются в сторону жидкой фазы, образуя гидратные оболочки, которые дополнительно стабилизируют дисперсную систему.

Кинетика формирования воздушно-поровой структуры определяется балансом между скоростью газовыделения, диффузионными процессами и изменением реологических свойств смеси во времени. Критическое время стабильности воздушных пор составляет 60–85 мин для Полипласт Аэро 815, что значительно превышает показатели других рассматриваемых добавок (рисунок 3.10).

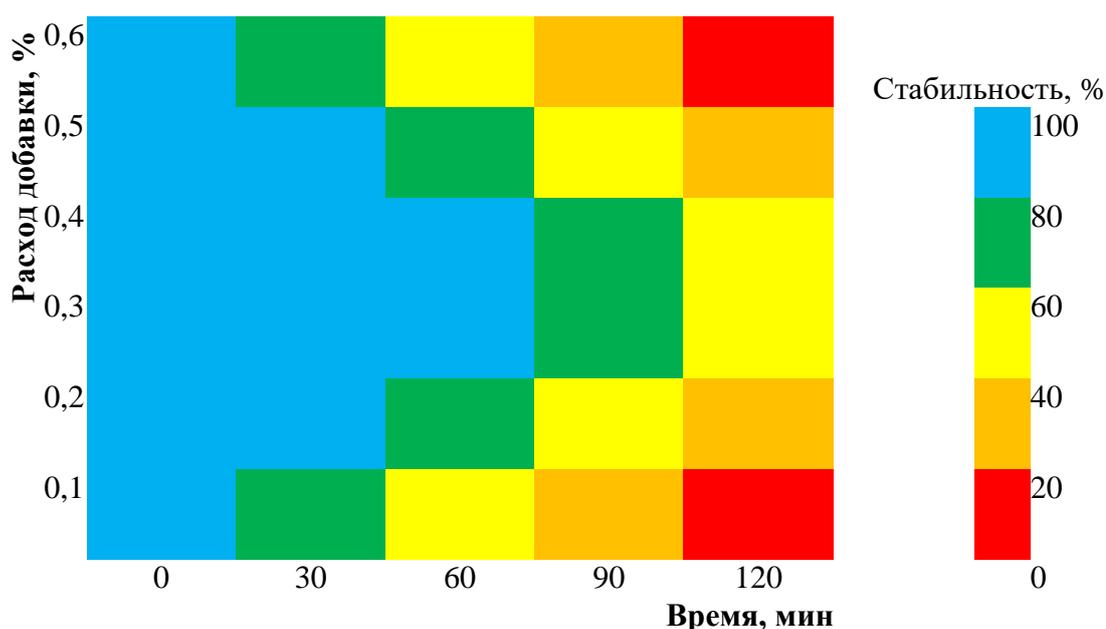


Рисунок 3.10 – Стабильность воздушных пор в ячеистобетонной смеси в зависимости от расхода добавки Полипласт Аэро 815 и времени

Стабильность воздушных пор оценивается по формуле:

$$S = \frac{V_t}{V_0} \times 100\%, \quad (3.14)$$

где V_t – объем пор через время t , V_0 – начальный объем пор.

Тепловая карта стабильности воздушных пор (рисунок 3.10) демонстрирует, что максимальная устойчивость пенной структуры достигается при дозировке Полипласт Аэро 815 0,15–0,20 % и времени до 60 мин, что соответствует периоду интенсивного структурообразования ячеистобетонной смеси. При дозировках менее 0,10 % наблюдается недостаточная стабилизация пор, а при превышении 0,45 % происходит избыточное воздухововлечение с последующей коалесценцией пузырьков.

Таким образом, воздухововлекающие добавки играют определяющую роль в формировании пористой структуры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавногo твердения, обеспечивая контролируемое воздухововлечение, стабилизацию газовых включений и комплексное улучшение эксплуатационных свойств материала. Воздухововлекающая добавка Полипласт Аэро 815, выбранная для дальнейших исследований на основе превосходящих технических характеристик, представляет собой эффективное решение для производства высококачественных ячеистых бетонов с заданными свойствами.

3.4. Агрегатные состояния в модельных ячеистобетонных смесях

Технологии формирования полидисперсных материалов основаны на физико-химической технологии – науке, изучающей рациональные и экономичные методы преобразования сырья в целевые продукты [163]. Важной особенностью является необходимость использования исходных твердых компонентов в мелкодисперсном или коллоидном состоянии, что делает объектом изучения дисперсные системы с позиций коллоидной химии и физико-химии поверхностных явлений [164]. Эффективность процессов определяется не только химическими реакциями, но и спецификой физико-химических процессов дисперсной среды.

Структура дисперсной системы – это ее пространственная организация, характеризующаяся размером частиц, расстоянием между ними, числом частиц на единицу объема, удельной поверхностью и долей фаз (твердой, жидкой, газообразной). Эти параметры влияют на физико-механические свойства системы. При стабильности параметров система считается стационарной, но технологически часто требуется перевод системы в более упорядоченное и прочное состояние. Это достигается под воздействием энергетических факторов (теплового, химического, механического, электрического) или изменением свободной поверхностной энергии, что ведет к структурообразованию и самоорганизации системы с эволюционными изменениями структурных параметров [165].

Технология материалов на основе дисперсных систем представляет собой цепь изменений структурных характеристик под воздействием внешних или внутренних энергетических факторов, сопровождающихся физико-химическими процессами. Важно, чтобы скорость формирования структур соответствовала скорости протекания этих процессов, что является условием успешного получения материалов с улучшенными свойствами. Для обеспечения однородной структуры необходимо на ранних стадиях создавать условия, исключаящие дефекты, что требует точного моделирования систем на этапах их формирования и анализа конечных характеристик. Практически используются два подхода – физический и математический, основанные либо на моделировании упорядоченных пакетов частиц, либо на вероятностных схемах их размещения. Эти модели эффективны для стационарных систем, а при наличии динамического характера структуры важно учитывать изменения под воздействием технологических факторов, что усложняется множеством переменных, но может быть упрощено использованием объемных фазовых характеристик, связывающихся с другими структурными показателями [166].

Для определения количественного соотношения фаз в дисперсных системах часто используют весовой метод, основанный на расчете относительного содержания жидкой или твердой фаз [163]. В качестве дополнительных

показателей применяются истинная, кажущаяся и насыпная плотности, а также удельные объемы. Однако эти методы не дают полного представления о доле газовой фазы, которая является равноценным компонентом вместе с твердой фазой в двухфазных системах (Т + Г) и с твердой и жидкой фазами в трехфазных системах (Т + Ж + Г). Поэтому для более точного анализа состава дисперсных систем рекомендуется использовать показатель объемного содержания фаз, который учитывает вклад всех фаз в равной степени. Для любых условий технологического воздействия на систему сохраняется равенство, являющееся математической формой закона неизменности объемного фазового состава:

$$K_{m1} + K_{ж1} + K_{г1} = K_{m2} + K_{ж2} + K_{г2} = \dots = K_{mn} + K_{жn} + K_{гn} = 1, \quad (3.15)$$

где K_m , $K_{ж}$, K_g – объемное содержание твердой, жидкой и газообразной фаз в системе на соответствующей технологической стадии.

Соблюдение принципа постоянства фазового состава является одним из ключевых условий получения материалов с заданными структурными и эксплуатационными характеристиками. Закон неизменности объемного фазового состава дисперсной системы в сочетании с сохранением твердой фазы на всех этапах технологического цикла позволяет использовать объемную концентрацию твердой фазы (K_m) как универсальный критерий контроля и управления структурой материала. Этот параметр отражает ход структурообразующих процессов на всех стадиях производства и служит основным инструментом регулирования свойств конечного продукта.

Для технологий, направленных на получение плотных компактов, значение K_m должно увеличиваться на каждом этапе обработки, тогда как для методов создания пористых структур характерно его постепенное уменьшение или сложная зависимость от состояния системы. Преимущество параметра K_m заключается в его нормируемом диапазоне от 0 до 1, что облегчает количественную оценку и моделирование процессов структурной эволюции.

Закон постоянства объемного фазового состава служит теоретической основой для введения высокочувствительного структурно-энергетического параметра, который анализирует изменения соотношения объемной

концентрации твердой фазы и свободного порового пространства при переходах системы между структурными состояниями, как под влиянием внутренних процессов, так и внешних энергетических воздействий [167]. Этот параметр функционально связывает структурные характеристики, такие как дисперсность и удельная поверхность, с энергетическими факторами, включая свободную энергию межфазных поверхностей и химическую энергию системы. Кроме того, он учитывает тип и интенсивность внешних воздействий – механических, тепловых или комбинированных, что определяет направление и степень структурных преобразований материала.

Возможность разнообразной графической интерпретации величин, входящих в формулы для определения параметра n ($K_{m2} = f(K_{m1})$, $\Pi_2 = f(\Pi_1)$, $K_{m2}/\Pi_2 = f(K_{m1}/\Pi_1)$), позволяет визуализировать процесс перестройки структуры как на отдельных технологических этапах, так и в рамках всей технологии.

Анализ использования параметра n для трансформации структуры дисперсных систем выявляет следующие закономерности:

- стационарные структуры, не испытывающие заметных изменений под внешними влияниями, характеризуются значением $n = 1$;
- динамичные структуры с уменьшением объема системы имеют $n > 1$;
- динамичные структуры с увеличением объема системы обладают $n < 1$;
- системы с низкой начальной объемной концентрацией твердой фазы ($K_t = 0,3–0,45$) более чувствительны к внешним воздействиям по сравнению с высококонцентрированными ($K_t > 0,7$);
- степень отклонения системы от стационарного состояния пропорциональна величине энергетического воздействия.

Таким образом, параметр n служит эффективным инструментом количественной оценки динамики структурообразования с учетом интенсивности внешних или внутренних энергетических воздействий на систему.

Использование объемных концентраций фаз возможно при применении закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем, по которому, независимо от вида дисперсной системы или типа образующейся структуры, в

любой момент времени, сумма долей объемных концентраций твердой, жидкой и газовой фаз является величиной постоянной и равной единице:

$$Ж_1 + T_1 + Г_1 = Ж_2 + T_2 + Г_2 = 1,$$

где $Ж_1 + T_1 + Г_1$ – соответственно объемные концентрации твердой, жидкой и газовой фаз в начальном состоянии системы цемент-вода; $Ж_2 + T_2 + Г_2$ – то же в промежуточном или конечном состоянии системы [168].

В ходе исследования проведен эксперимент, в котором был запроектирован традиционный состав ячеистобетонной смеси. Задана необходимая плотность ячеистого бетона: 300, 400, 500, 600, 700, 800 кг/м³.

Согласно [169], произведен расчет водотвердого отношения:

$$B/T = \frac{m_{\text{вода}}}{m_T} = 0,561,$$

где $m_{\text{вода}}$ – масса воды, л; m_m – масса твердых компонентов исходного состава, кг.

Относительные объемы твердой и жидкой фаз или их объемные концентрации T_1 , $Ж_1$ в исходном состоянии определяются в относительных единицах по формулам:

$$T_1 = 1 - (m_T/m_{\text{общ}}), \quad Ж_1 = 1 - (m_{Ж}/m_{\text{общ}}),$$

где $m_{\text{общ}}$ – общая масса смеси в исходном состоянии, кг; m_m – масса твердой фазы в смеси, кг; $m_{жс}$ – масса жидкой фазы в смеси, кг.

После вычисления значений относительного объема твердой и жидкой фаз в исходном состоянии, определяем значения тех же параметров в конечном состоянии по формулам, согласно [170]:

$$T_2 = \frac{\rho_{я/б} - 0,1 \cdot m_{я/б} \cdot B/T}{\rho_{и}}$$

где $\rho_{я/б}$ – заданная плотность ячеистого бетона, кг/м³; $m_{я/б}$ – масса 1 м³ ячеистого бетона, кг; $\rho_{и}$ – истинная плотность цемента, кг/м³.

Объемное содержание жидкой и газовой фаз в смеси определяем по формулам, согласно [171]:

$$Ж_2 = B/T \cdot \frac{\rho_{я/б}}{\rho_{ж}}, \quad Г_2 = 1 - (T_2 + Ж_2)$$

Полученные результаты расчетов фазового состава ячеистых бетонов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Значения объемных характеристик ячеистого бетона в его конечном состоянии в зависимости от средней плотности

Средняя плотность, кг/м ³	В/Т = 0,561; $T_1 = 0,359$; $Ж_1 = 0,641$; $\Gamma_1 = 0$		
	$Ж_2$	T_2	Γ_2
300	0,168	0,091	0,741
400	0,224	0,122	0,654
500	0,281	0,152	0,567
600	0,337	0,183	0,48
700	0,393	0,213	0,394
800	0,449	0,244	0,307

По известным значениям T_1 и $Ж_1$ на соответствующей стороне треугольника $T_1-Ж_1$ (рисунок 3.11) откладывается точка z начального фазового состава, соединяющаяся прямой линией с вершиной треугольника Γ .

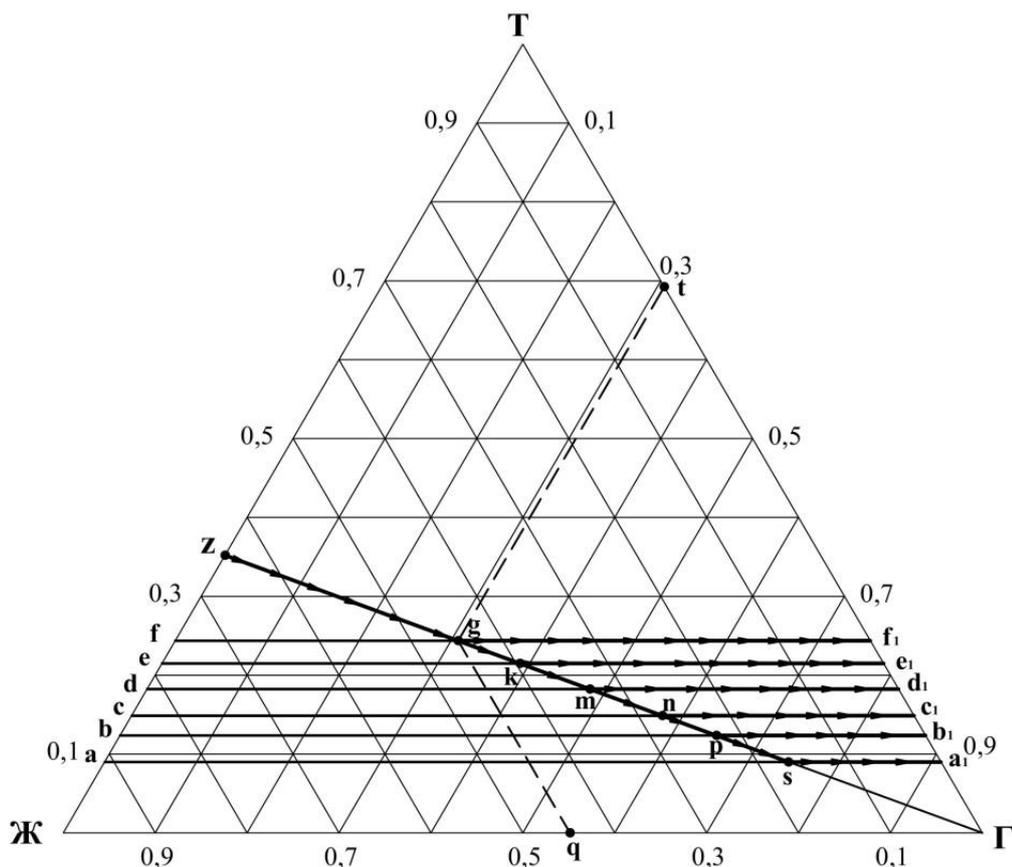


Рисунок 3.11 – Диаграмма изменения фазового состава ячеистобетонной смеси в процессе поризации

Окончание стадии поризации определяется точкой пересечения линии поризации с горизонтальной линией $T_2 = const$, уровень которой определяется по значению T_2 : линия aa_1 соответствует значению $T_2 = 0,091$ при $\rho_{я/б} = 300 \text{ кг/м}^3$; $bb_1 - T_2 = 0,122$, $\rho_{я/б} = 400 \text{ кг/м}^3$; $cc_1 - T_2 = 0,152$, $\rho_{я/б} = 500 \text{ кг/м}^3$; $dd_1 - T_2 = 0,183$, $\rho_{я/б} = 600 \text{ кг/м}^3$; $ee_1 - T_2 = 0,213$, $\rho_{я/б} = 700 \text{ кг/м}^3$; $ff_1 - T_2 = 0,244$, $\rho_{я/б} = 800 \text{ кг/м}^3$.

Точки s, p, n, m, k, g характеризуют окончание стадии поризации и начало твердения ячеистобетонной смеси. Линии $sa_1, pb_1, nc_1, md_1, ke_1, gf_1$ с указанными на них направлениями показывают начало удаления свободной воды из образца при его сушке и твердение смеси. Конечный фазовый состав ячеистого бетона на линии ТГ треугольника соответствует расчетному составу.

В результате, например, линия zgf_1 характеризует протекание процесса поризации и твердения ячеистобетонной смеси плотностью $\rho_{я/б} = 800 \text{ кг/м}^3$. Для проверки правильности изображенного процесса, проведем из точки g прямую gt , параллельную стороне $ЖТ$ треугольника $ЖТГ$ и прямую gq , параллельную стороне $ТГ$. В первом случае, на стороне ТГ при пересечении прямой образуется точка t со значением объемного содержания газовой фазы $\Gamma_2 = 0,307$. Во втором случае, на стороне $ГЖ$ при пересечении прямой образуется точка q со значением объемного содержания жидкой фазы $\mathcal{J}_2 = 0,449$. Эти показатели подтверждают полученные ранее расчетные значения Γ_2 и \mathcal{J}_2 .

Необходимое количество воздухововлекающей добавки определяется исходя из соответствующего объемного содержания газовой фазы в 1 м^3 ячеистобетонной смеси. Зависимость необходимого объема газовой фазы от плотности получаемого ячеистого бетона носит линейный характер.

Эффективное управление количественно-качественных изменений структурных характеристик дисперсных систем осуществляется при соблюдении принципа постоянства объемного фазового состава дисперсной системы и принципа технологического соответствия скорости изменения структурных характеристик системы и скорости протекания физико-химических процессов, сопровождающих данную технологическую операцию [170].

Сопоставление отношений объемной концентрации твердой фазы и свободного порового пространства начального, текущего и конечного состояний дисперсных структур является основой для количественной оценки процесса трансформации структур с помощью универсального структурно-энергетического параметра. Универсальность этого параметра обусловлена его применимостью при оценке перестройки структур не только в различных системах, но и при осуществлении всех стадий или операций технологического процесса получения материалов на основе дисперсных систем.

В ходе исследования установлено, что процесс поризации происходит при участии всех трех фаз дисперсной системы. При введении порообразователя ячеистобетонная смесь из исходного двухфазного состояния (твердая + жидкая) переходит в трехфазное (твердая + жидкая + газообразная). Изменение фазового состава происходит вследствие удаления свободной воды из ячеистобетонного образца при его сушке. Конечный фазовый состав будет соответствовать расчетному составу, при условии учета химически связанной воды при расчете K_{m2} .

Моделирование процессов, протекающих на стадии формирования пористой структуры, проведено для смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с маркой по средней плотности $D500$ и классом по прочности $B2,5$. Состав смеси по приведен в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Состав смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Показатели	Компоненты смеси			
	Цемент	Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	Полипласт АЭРО 815	Вода
Расход, кг на 1 м ³	270	190	0,7	160
Средняя плотность, кг/м ³	3150	2650	990	1000
Объемное содержание ингредиентов, л/м ³	87	93	0,19	160

В ходе расчета были определены:

- объемное содержание компонентов;
- плотность изготовленной смеси на различных стадиях;

– координаты точек, описывающие происходящие процессы в смеси с учетом закона постоянства фазового состава дисперсной системы.

Для автоматизации проводимых расчетов разработана и запатентована программа (ЭВМ) для моделирования изменения фазового состава ячеистых бетонов неавтоклавного твердения при введении показателей массы и плотности цемента, золы-уноса, воды и процента воздухововлечения в качестве начальных параметров (приложение Б). Изменение фазового состава твердеющей ячеистобетонной смеси в процессе поризации моделируется с учетом воздухововлечения и термовакуумирования смеси. ЭВМ обеспечивает выполнение следующих функций: определяет координаты для построения диаграммы агрегатных состояний ячеистого бетона в тройной системе координат, присваивает марку по плотности, определяет водоцементное, водотвердое и золоцементное отношение [171].

Расчет компонентов смеси производился с учетом следующих соотношений: $З/Ц = 0,7$; $В/Ц = 0,59$; $В/Т = 0,35$. Объемное содержание компонентов смеси подбиралось таким образом, чтобы общий объем смеси составил 1 м^3 . Диаграмма агрегатных состояний для модельной смеси термовакуумированного ячеистого бетона на основе дисперсных систем представлена на рисунке 3.12.

Точка A_1 отображает агрегатное соотношение фаз в исходном состоянии смеси. Координаты точки A_1 по Т:Ж:Г составляют $[0,53; 0,47; 0,00]$.

Участок A_1A_2 характеризует процесс поризации на данном этапе при введении воздухововлекающей добавки (4 %) ячеистобетонная смесь из исходного двухфазного состояния (Т+Ж) переходит в трехфазное (Т+Ж+Г); A_2A_3 – процесс термовакуумирования (воздействие на смесь температуры и вакуума); A_3A_4 – процесс гидратации цемента; A_4A_5 – обезвоживание (сушка) ячеистого бетона. Координаты точки A_5 по Т:Ж:Г составляют $[0,221; 0,0; 0,779]$, что говорит о полном твердении ячеистобетонной смеси, ввиду отсутствия жидкой фазы (обезвоживание), и образовании ячеистого бетона с качественной пористой структурой.

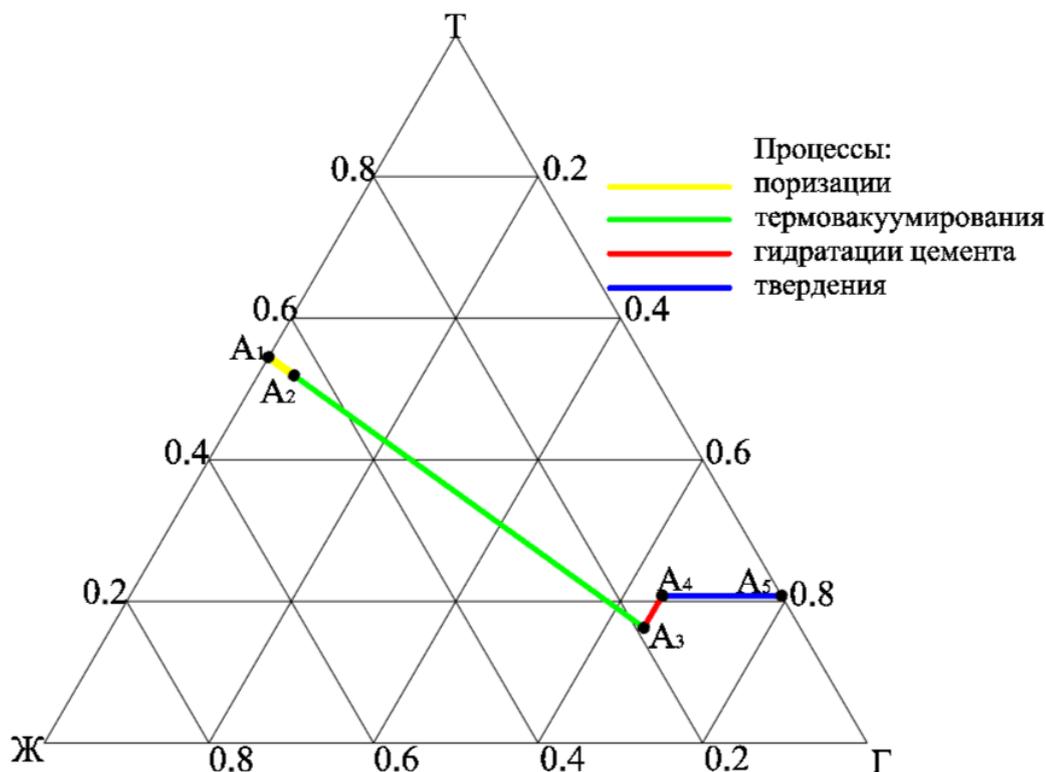


Рисунок 3.12 – Диаграмма агрегатных состояний для модельной смеси термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавно твердения марки по средней плотности $D500$

Процесс формирования пористой структуры ячеистого бетона базируется на модельных представлениях о динамике расширяющейся поры в жидкой фазе как единичной контрольной ячейки, позволяющие вести адекватный анализ экспериментальных наблюдений и данных для получения достаточно надежных качественных выводов и количественных оценок процессов, протекающих при формировании пористой структуры ячеистого бетона. При этом следует иметь в виду, что закономерности процессов в смесях проявляются лишь статически.

Сопоставление отношений объемной концентрации твердой фазы и свободного порового пространства начального, текущего и конечного состояний дисперсных структур является основой для количественной оценки процесса трансформации структур с помощью универсального структурно-энергетического параметра. Универсальность этого параметра обусловлена его применимостью при оценке перестройки структур не только в различных системах, но и при осуществлении всех стадий или операций технологического процесса получения материалов на основе дисперсных систем [172].

В ходе исследования установлено, что процесс поризации происходит при участии всех трех фаз дисперсной системы. При введении воздухововлекающей добавки, ячеистобетонная смесь из исходного двухфазного состояния (Т + Ж) переходит в трехфазное (Т + Ж + Г). Изменение фазового состава происходит вследствие удаления свободной воды из образца при его сушке. Конечный фазовый состав будет соответствовать расчетному составу, при условии учета химически связанной воды при расчете конечной величины объема твердой фазы.

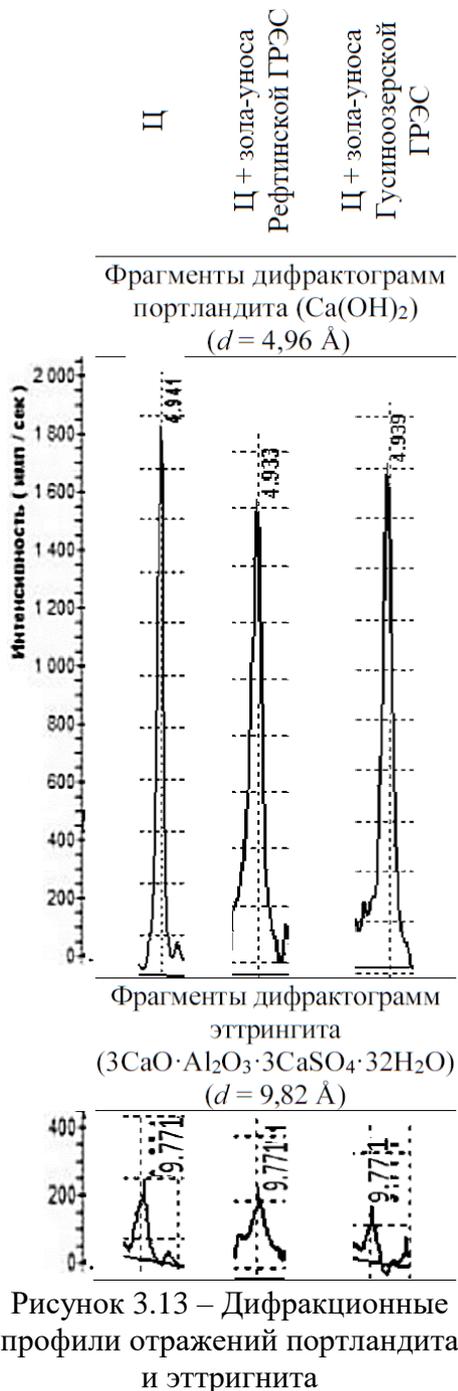
3.5. Структурообразование и свойства цементного камня

Введение минеральных заполнителей влияет на процессы твердения, состав образующихся веществ и внутреннее строение термовакuumированного ячеистого бетона. Для изучения этих изменений проведены исследования состава веществ, скорости твердения и особенностей внутренней структуры бетона с разными заполнителями. Использовались методы рентгенфазового анализа и электронной микроскопии. Все образцы твердели при влажности воздуха 95 % и температуре 18–22 °С. Исследовались составы с портландцементом и добавлением зол-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС. Контрольный состав содержал только портландцемент.

В рентгенофазовом анализе образцов через 28 сут твердения определены следующие вещества: кварц – основное кремнеземистое вещество, присутствующее во всех составах, с характерными пиками при углах 26,65°, 20,8° и 36,5°; гидроксид кальция – промежуточное вещество, образующееся при взаимодействии цемента с водой, с выраженными пиками при углах 18,09°, 34,09° и 47,1°; гидросиликатный гель – основное связующее вещество цементного камня, проявляющееся в широкой области углов 28–35°; остаточные минералы цемента – негидратированные частицы исходного цемента при углах 32,18° и 32,52°; алюмосиликатные соединения золы – минералы, входящие в состав золы-уноса, с пиком при угле 23,9°.

Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с характерным отражением при $d = 4,96 \text{ \AA}$ демонстрирует незначительное снижение интенсивности в составах с золой-уноса (на 5–12 %), что свидетельствует о стабильности данной фазы при использовании

золы-уноса в качестве заполнителя (рисунок 3.13). Этtringит с характерным отражением при $d = 9,82 \text{ \AA}$ присутствует в минимальных количествах в обычных составах.



Гидросиликатный гель выступает в роли основного связующего вещества, а алюмосиликатные соединения золы-уноса участвуют в формировании структуры.

Кинетика твердения термовакуумированного ячеистого бетона характеризуется интенсивным развитием процессов на ранних стадиях с различиями в зависимости от типа заполнителя (рисунок 3.14). В контрольном составе степень завершения процессов взаимодействия цемента с водой через 1 сут составляет 18 %, через 7 сут достигает 55 %, к 28 сут – 95 %. Развитие прочности происходит равномерно, что отражает нормальное протекание процессов твердения цемента.

Введение золы-уноса Рефтинской ГРЭС ускоряет процессы твердения: степень завершения процессов через 1 сут возрастает до 25 %, через 7 сут – до 72 %, достигая 97 % к 28 сут. Ускорение обусловлено физическими факторами: увеличением общей поверхности системы за счет мелких частиц золы, созданием дополнительных мест для роста кристаллов на поверхности частиц

золы, улучшением распределения частиц в смеси. Развитие прочности происходит более интенсивно.

Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС показывает промежуточные характеристики: степень завершения процессов 22 % через 1 сут, 65 % через 7 сут,

95 % к 28 сут. Менее выраженное ускорение связано с более низкой удельной поверхностью частиц по сравнению с золой-уноса Рефтинской ГРЭС. Промежуточные показатели обусловлены особенностями размера и формы частиц золы.

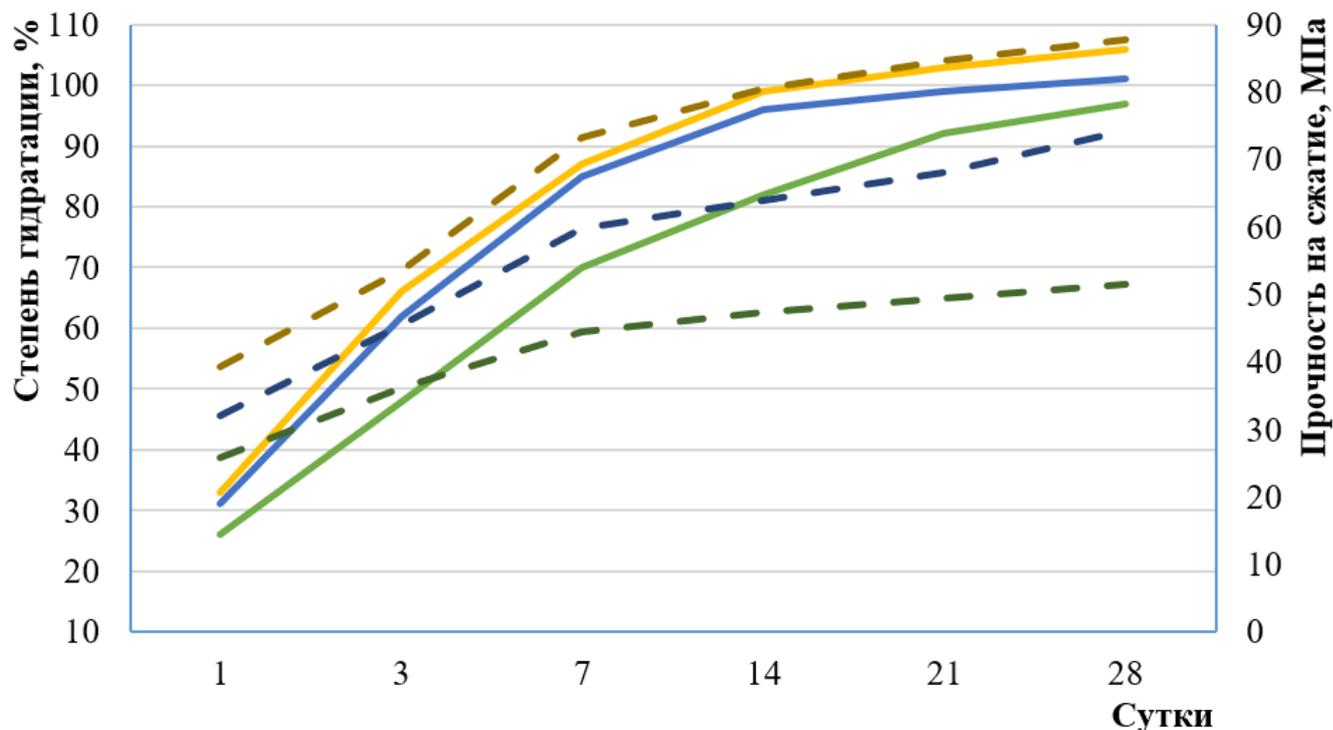


Рисунок 3.14 – Кинетика гидратации и набора прочности образцов: — — — — — степень гидратации контрольного состава, %; — — — — — прочность на сжатие контрольного состава, МПа; — — — — — степень гидратации состава с золой-уноса Рефтинской ГРЭС, %; — — — — — прочность на сжатие состава с золой-уноса Рефтинской ГРЭС, МПа; — — — — — степень гидратации состава с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС, %; — — — — — прочность на сжатие состава с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС, МПа

Микроструктурные исследования методом электронной микроскопии проводились на плотных образцах цементного камня для изучения особенностей строения и характера распределения веществ в зависимости от типа минерального заполнителя. В контрольном составе плотного цементного камня (рисунок 3.15, а) микроструктура характеризуется обычным набором веществ, образующихся при твердении портландцемента, с преобладанием аморфного гидросиликатного геля переменного состава. Гель представлен неоднородными образованиями неправильной формы размером 0,5–3 мкм, создающими пространственную сетку с многочисленными порами размером 10–200 нм.

Гидроксид кальция представлен крупными пластинчатыми кристаллами размером 15–50 мкм, хаотично распределенными в цементной матрице.

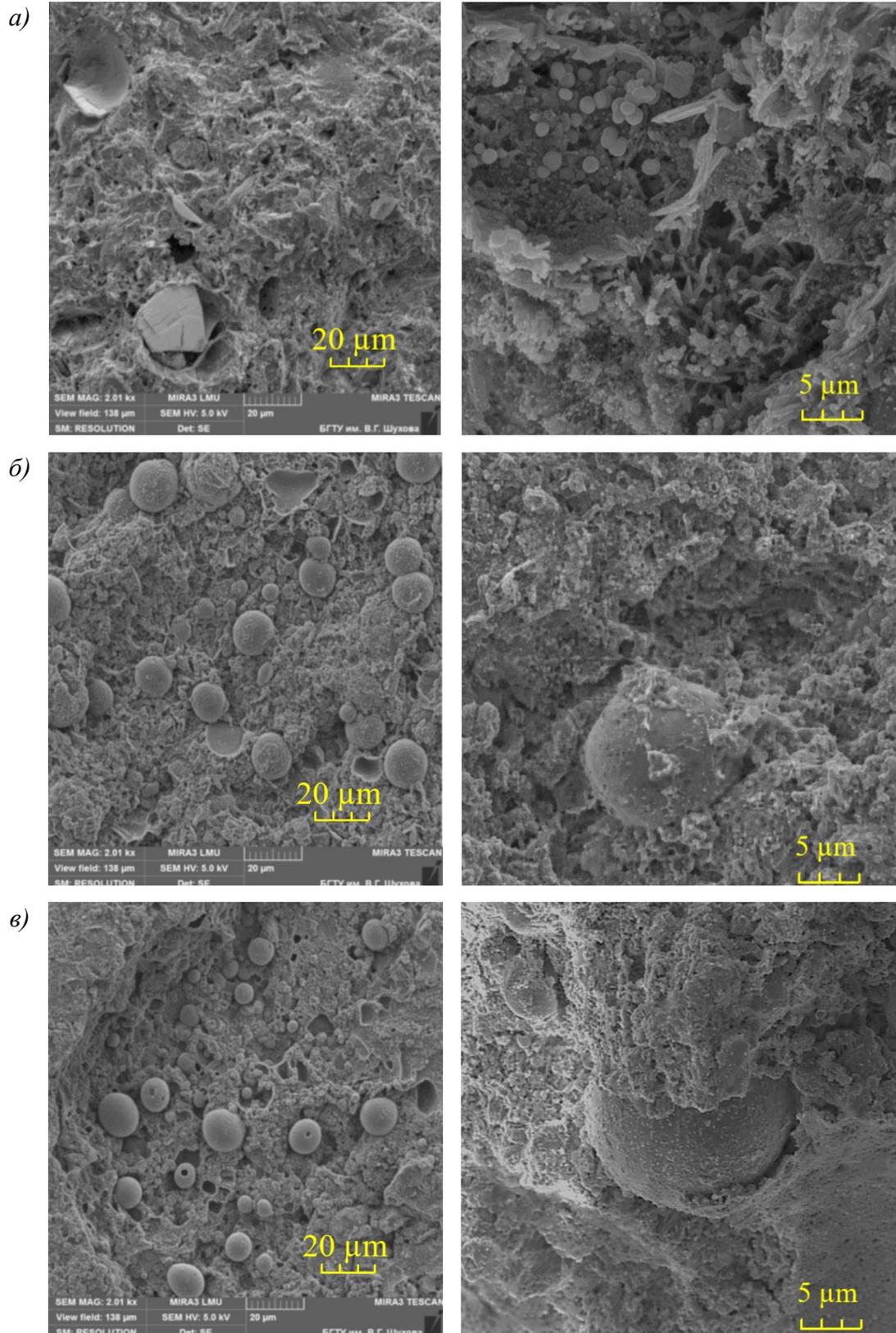


Рисунок 3.15 – Микроструктура цементного камня: *а* – без добавок; *б* – с золой-уноса Рефтинской ГРЭС; *в* – с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС

Введение золы-уноса Рефтинской ГРЭС изменяет строение цементной матрицы за счет физического эффекта заполнения (рисунок 3.15, б). Сферические частицы золы размером 10–50 мкм равномерно распределены в цементной матрице, заполняя пустоты между частицами цемента и улучшая упаковку системы. Частицы золы не вступают в химические взаимодействия с цементом, а действуют как инертный наполнитель, создавая дополнительные поверхности для роста кристаллов гидратных продуктов. Гидросиликатный гель приобретает более плотную структуру благодаря лучшему распределению частиц в системе.

Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС создает промежуточную структуру с менее выраженным эффектом заполнения по сравнению с золой-уноса Рефтинской ГРЭС (рисунок 3.15, в). Частицы золы имеют более широкое распределение по размерам (15–80 мкм) с присутствием крупных включений, создающих неоднородность структуры. Эффект заполнения пустот развит умеренно из-за более низкой дисперсности материала. Гидросиликатный гель характеризуется промежуточной степенью уплотнения между контрольным составом и системой с золой-уноса Рефтинской ГРЭС.

Сравнительный анализ структурных характеристик показывает, что введение золы-уноса Рефтинской ГРЭС обеспечивает наиболее эффективное улучшение структуры с формированием плотной матрицы и заданными показателями пористости за счет эффекта физического заполнения. Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС демонстрирует промежуточные характеристики с умеренным улучшением структурных параметров.

Таким образом, комплексные исследования структурообразования термовакuumированного ячеистого бетона с различными минеральными наполнителями показали, что зола-уноса действует преимущественно как физический наполнитель без значительных химических взаимодействий с цементом. Рентгенофазовый анализ подтвердил сохранение основных продуктов твердения портландцемента при введении золы-уноса с незначительными изменениями в составе. Микроструктурные исследования выявили эффект физического заполнения, приводящий к повышению плотности матрицы и

улучшению упаковки частиц. Кинетические закономерности отражают ускорение процессов твердения за счет увеличения поверхности кристаллизации и распределения частиц в системе.

3.6. Выводы

1. Разработаны теоретические основы моделирования динамики расширения газовых пор в вязкоупругой среде с применением адаптированного уравнения Рэлея-Плессета для ячеистобетонных смесей и принципов сохранения объемного фазового состава дисперсных систем.

2. Определены закономерности воздействия величины вакуума на формирование структуры ячеистого бетона. Варьирование величины вакуума в пределах 0,055–0,095 МПа обеспечивает переход от кинетически ограниченного процесса газовыделения к равномерному формированию сферических пор. Превышение величины вакуума свыше 0,095 МПа вызывает слияние пор и критическую усадку материала, в то время как недостаточная величина вакуума (менее 0,055 МПа) не обеспечивает преодоление энергетического барьера для устойчивого порообразования.

3. Выявлено, что кинетика гидратации подчиняется закону Аррениуса и достигает оптимума при температуре 39–43 °С, что соответствует максимальной степени гидратации, интенсивности газообразования и скорости набора прочности. Поддержание данного температурного режима обеспечивает 97–100 % степень гидратации в течение первых суток с одновременным повышением скорости газообразования и прочностных характеристик.

4. Исследованы характеристики воздухововлекающих добавок, способствующие улучшению их функциональных качеств. Показано, что воздухововлекающая добавка Полипласт АЭРО 815 сохраняет 94–100 % активности, обеспечивая технологическую стабильность процесса при термовакуумной обработке с высокой надежностью, что определило ее использование в последующих исследованиях.

5. Сформулированы основы регулирования фазового состава ячеистобетонной смеси на основе диаграммы агрегатных состояний, описывающей последовательность этапов структурообразования. С применением закона сохранения объемного фазового состава дисперсных систем формализован процесс трансформации от исходного состояния системы через этапы воздухововлечения, термовакuumирования, гидратации цемента и твердения изделий, что обеспечивает количественное описание изменения объемных концентраций фаз на каждой технологической стадии.

6. Выполнено исследование процессов структурообразования и фазового состава термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с анализом влияния минеральных заполнителей (зол-уноса Рефтинской и Гусиноозерской ГРЭС) и механизмов их взаимодействия с компонентами цементной матрицы. Рентгенофазовый анализ показал уменьшение интенсивности рефлексов портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в составах с золой-уноса на 5–12 %. Гидросиликатный гель функционирует как основное связующее, а алюмосиликатные компоненты золы-уноса принимают участие в структурообразовании. Микроструктурные исследования установили, что зола-уноса функционирует главным образом в качестве заполнителя, формируя плотную, равномерно организованную матрицу с расширением общей поверхности кристаллизации и оптимизацией распределения частиц.

4. СОСТАВЫ И СВОЙСТВА ТЕРМОВАКУУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

4.1. Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на эксплуатационные свойства ячеистых бетонов неавтоклавного твердения с применением метода математического планирования эксперимента

Ключевым этапом в технологии производства ячеистого бетона является стадия формирования пористой структуры – поризации, в результате которой возникает ячеистая структура бетона. При этом важными факторами становятся качество и целостность образующейся структуры, определяющие физико-механические характеристики и эксплуатационные показатели изделий из ячеистого бетона. На сегодняшний день существуют различные способы порообразования ячеистого бетона. Улучшению свойств и совершенствованию рецептуры и технологии ячеистых бетонов посвящены работы многих отечественных ученых.

Проведены исследования для изучения влияния водотвердого отношения (В/Т), количества воздухововлекающей добавки и величины вакуума на среднюю плотность и прочность термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона. Опыты проводились с предварительно подобранными сырьевыми компонентами [173]. Поставлены два трехфакторных эксперимента с изучением влияния водотвердого отношения, расхода воздухововлекающей добавки и величины вакуума на среднюю плотность и прочность на сжатие термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС и Гусиноозерской ГРЭС.

4.1.1. Зависимость средней плотности и прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона на основе золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от исследуемых факторов

Технологические параметры производства термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения на основе золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС и его физико-механические свойства получены с использованием математического аппарата. В качестве варьируемых факторов были приняты: водотвердое отношение В/Т (X_1) в пределах от 0,35 до 0,45 с интервалом

варьирования 0,05; расход воздухововлекающей добавки Полипласт Аэро 815 (X_2) от 0 до 0,5 % от массы цемента с интервалом варьирования 0,25; величину вакуума (X_3) от 0,075 до 0,095 МПа с интервалом варьирования 0,01 (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	0,35	0,40	0,45	0,05
Воздухововлекающая добавка «Полипласт Аэро 815», % Ц	X_2	0	0,25	0,5	0,25
Величина вакуума, МПа	X_3	0,075	0,085	0,095	0,01

Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными, в том числе температура формовочной смеси $t_{см} = \text{const} = 41$ °С.

Разрабатывалась матрица трехуровневого плана с применением экспериментальных данных термовакуумированного неавтоклавногo ячеистого бетона на основе золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Кодированный вид			Экспериментальные данные	
	X_1	X_2	X_3	Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
1	1	1	1	445	2,2
2	1	1	-1	659	4,3
3	1	-1	1	579	2,9
4	1	-1	-1	856	5,7
5	-1	1	1	556	2,3
6	-1	1	-1	823	4,5
7	-1	-1	1	723	3,1
8	-1	-1	-1	1070	6,0
9	1	0	0	670	4,0
10	-1	0	0	576	4,3
11	0	1	0	552	2,9
12	0	-1	0	718	5,3
13	0	0	1	497	3,5
14	0	0	-1	736	4,8
15	0	0	0	596	4,2
16	0	0	0	608	4,4
17	0	0	0	599	4,3

В лабораторных условиях заформованы 17 серий ячеистобетонных образцов размерами 100×100×100 мм. Образцы выдержаны в нормальных условиях твердения в течение 28 сут, по истечении которых определены их физико-механические показатели.

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

Рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии и их значимость.

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

Свободный член b_0 вычисляется по формуле:

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

Коэффициенты для линейных членов определяются по формуле:

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

Коэффициенты для квадратичных членов рассчитываются по формуле:

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

Коэффициенты при взаимодействиях определяются по формуле:

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

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле:

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

Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по формуле:

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

Среднеквадратичная ошибка рассчитывается по формулам:

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

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

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

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

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

Полученные расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии

Параметр	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
$\rho_{ср}$, кг/м ³	591,68	-53,9	-91,1	-134,4	38,32	50,32	31,82	10,38	15,38	17,88
$R_{сж}$, МПа	4,28	-0,12	-0,68	-1,14	-0,07	-0,17	-0,17	0,03	0,03	0,18

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

Расчетные значения t_p критерия Стьюдента определяются по формулам:

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

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

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

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

Расчетные значения критерия Стьюдента представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные значения критерия Стьюдента

Параметр	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
ρ_{cp} , кг/м ³	21,31	-2,63	-4,44	-6,55	0,97	1,27	0,8	0,45	0,67	0,77
$R_{сж}$, МПа	27,46	-1,04	-5,9	-9,89	-0,31	-0,77	-0,77	0,19	0,19	1,36

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

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

$$\begin{aligned} \rho_{cp} = & 591,68 - 53,9 \cdot X_1 - 91,1 \cdot X_2 - 134,4 \cdot X_3 + 38,32 \cdot X_1^2 + \\ & + 50,32 \cdot X_2^2 + 31,82 \cdot X_3^2 + 10,38 \cdot X_1 \cdot X_2 + 15,38 \cdot X_1 \cdot X_3 + 17,88 \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} R_{сж} = & 4,28 - 0,12 \cdot X_1 - 0,68 \cdot X_2 - 1,14 \cdot X_3 - 0,07 \cdot X_1^2 - \\ & - 0,17 \cdot X_2^2 - 0,17 \cdot X_3^2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,18 \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Адекватность моделей (оценка адекватности проводилась по критерию Фишера) позволяет определять параметры изготовления изделий с заданными свойствами. Находим расчетное значение критерия Фишера F_p по формуле:

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

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

Построены зависимости прочности на сжатие и средней плотности термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона от В/Т, количества воздухововлекающей добавки и величины вакуума (рисунки 4.1–4.3).

Из рисунка 4.1 видно, что при низких значениях В/Т исходные формовочные массы с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС достаточно жесткие, что отрицательно сказалось на процессе вспучивания – наблюдается недовспучивание смесей, в следствие чего материал получился более плотным и прочным.

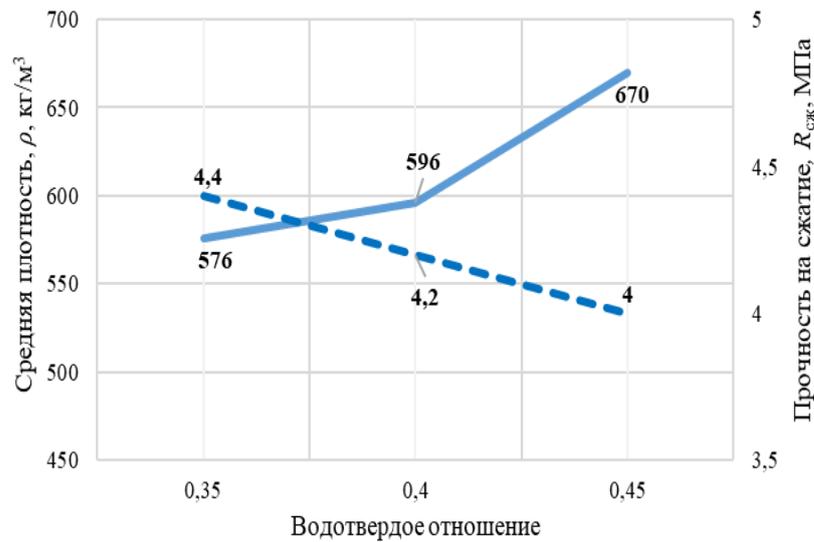


Рисунок 4.1 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие (R) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от водотвердого отношения: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

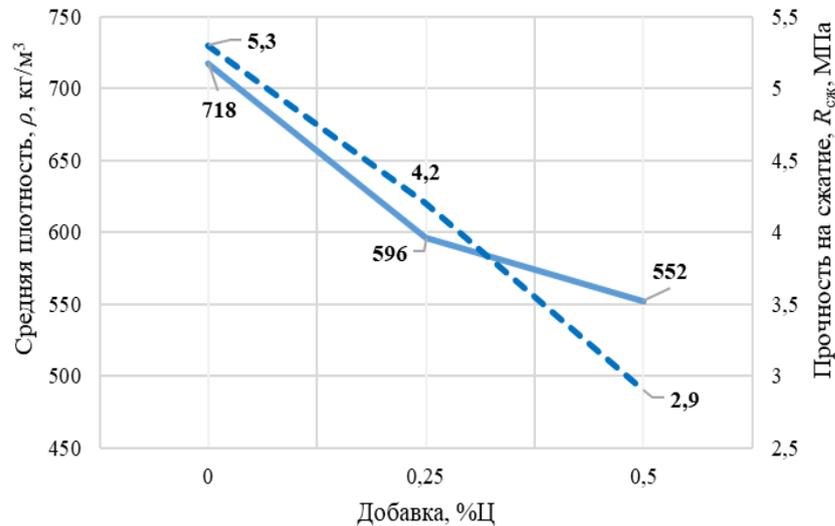


Рисунок 4.2 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие (R) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от содержания добавки: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

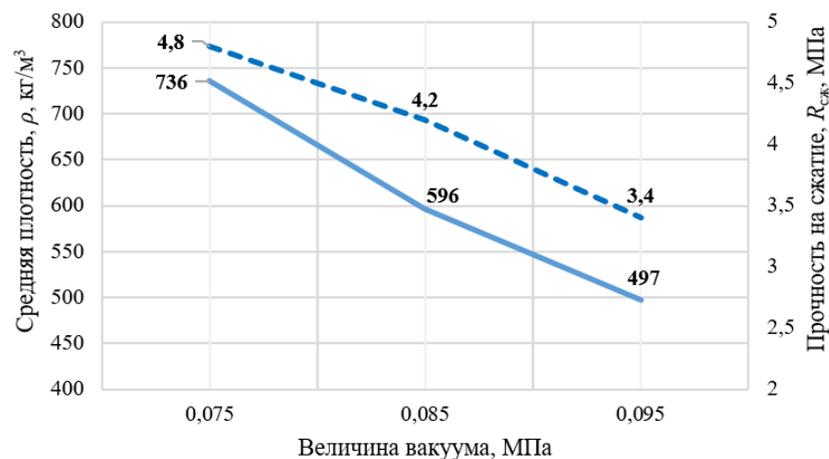


Рисунок 4.3 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие (R) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от величины вакуума: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

Комплексное представление о влиянии В/Т, воздухововлекающей добавки и давления вакуума на выходные параметры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей выходных параметров от совокупности исследуемых факторов (рисунки 4.4–4.9).

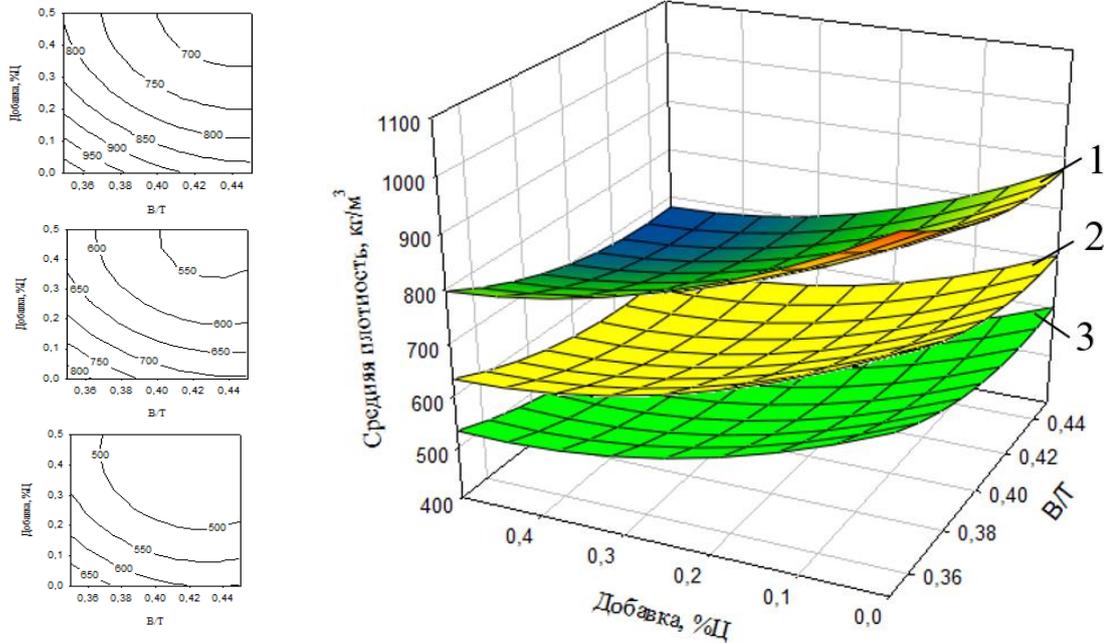


Рисунок. 4.4 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – вакуум = 0,075 МПа; 2 – вакуум = 0,085 МПа; 3 – вакуум = 0,095 МПа

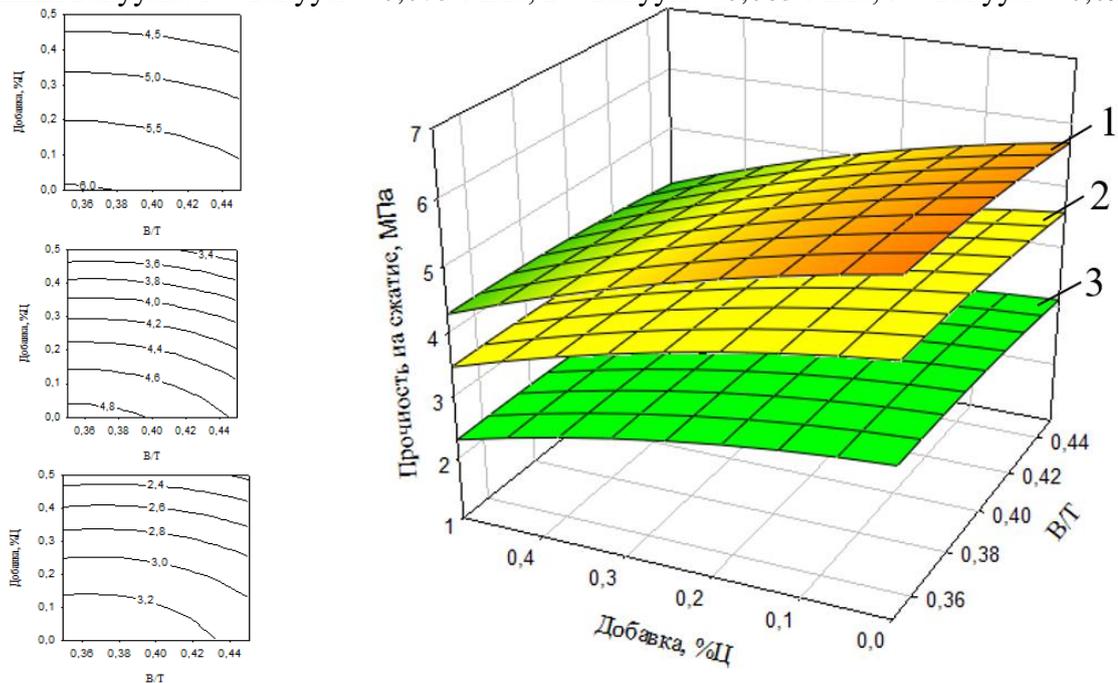


Рисунок. 4.5 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – вакуум = 0,075 МПа; 2 – вакуум = 0,085 МПа; 3 – вакуум = 0,095 МПа

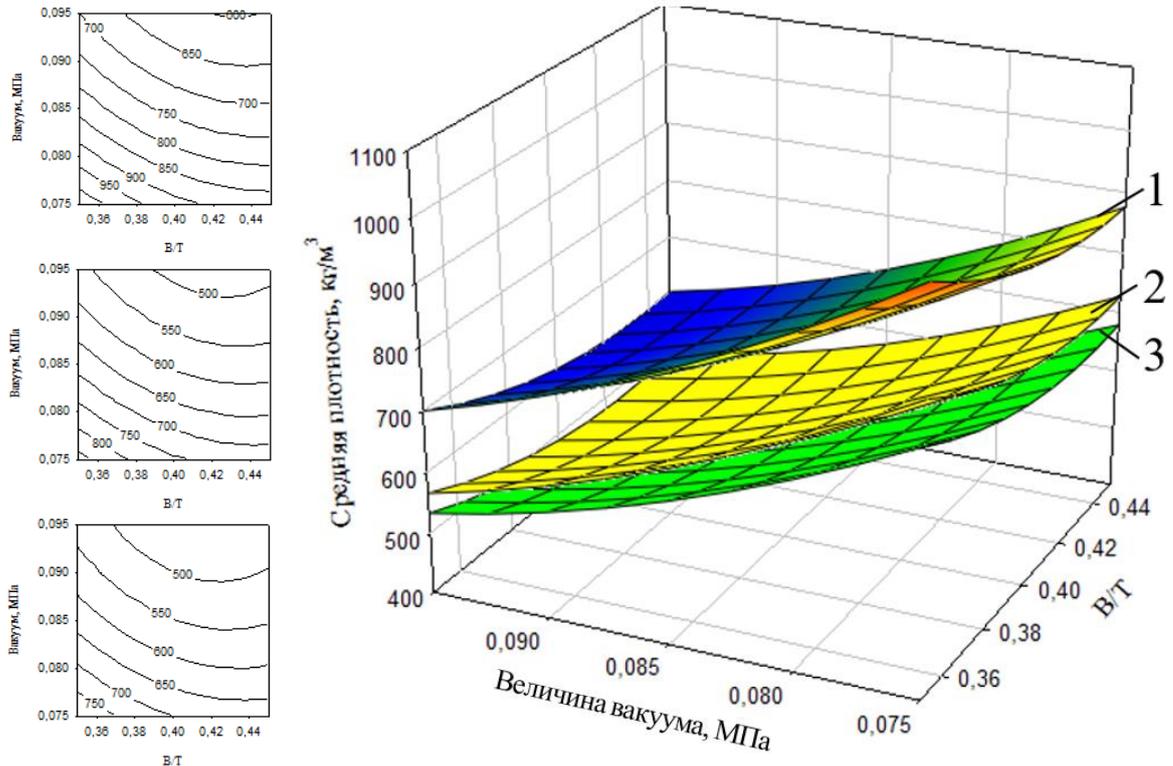


Рисунок 4.6 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – добавка = 0 % от Ц; 2 – добавка = 0,25 % от Ц; 3 – добавка = 0,5 % от Ц

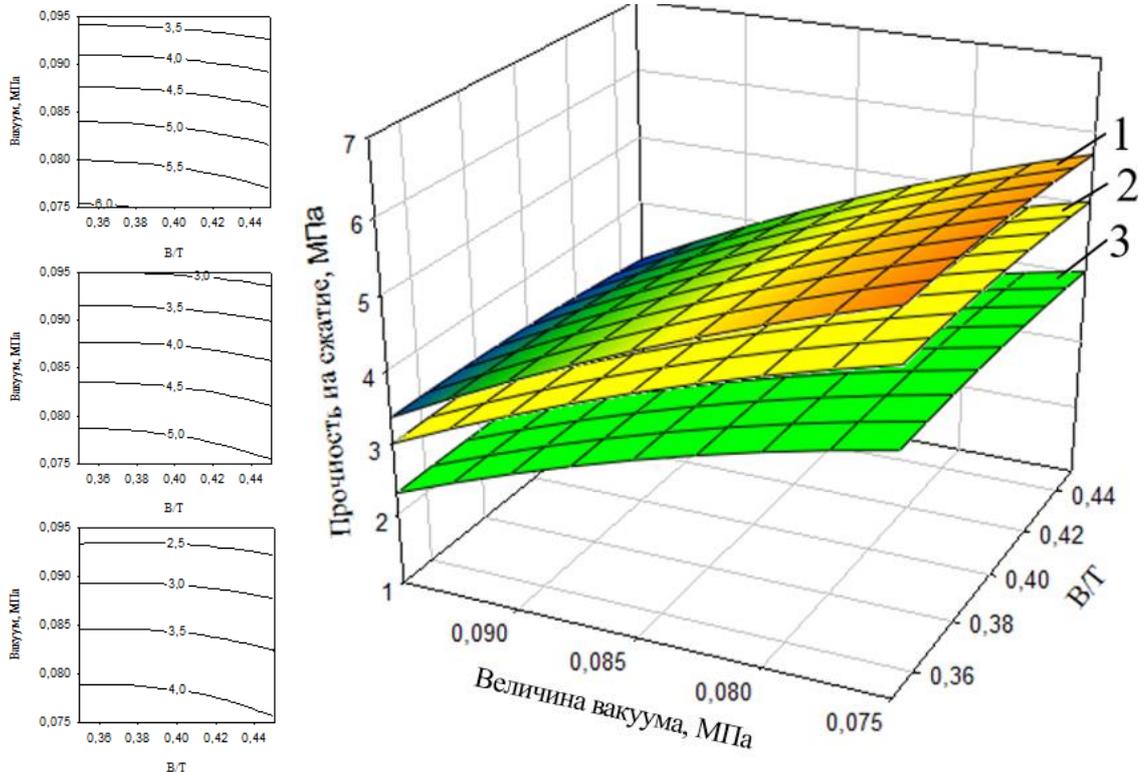


Рисунок 4.7 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – добавка = 0 % от Ц; 2 – добавка = 0,25 % от Ц; 3 – добавка = 0,5 % от Ц

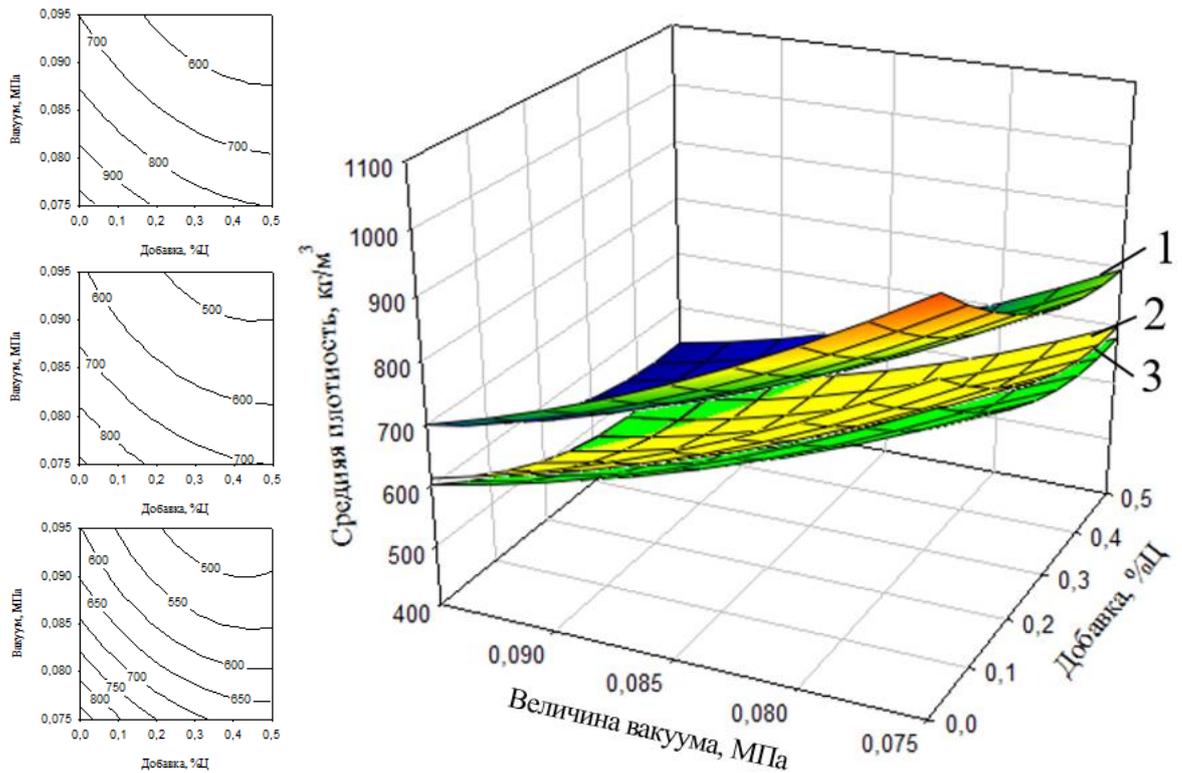


Рисунок 4.8 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – В/Т = 0,35; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,45

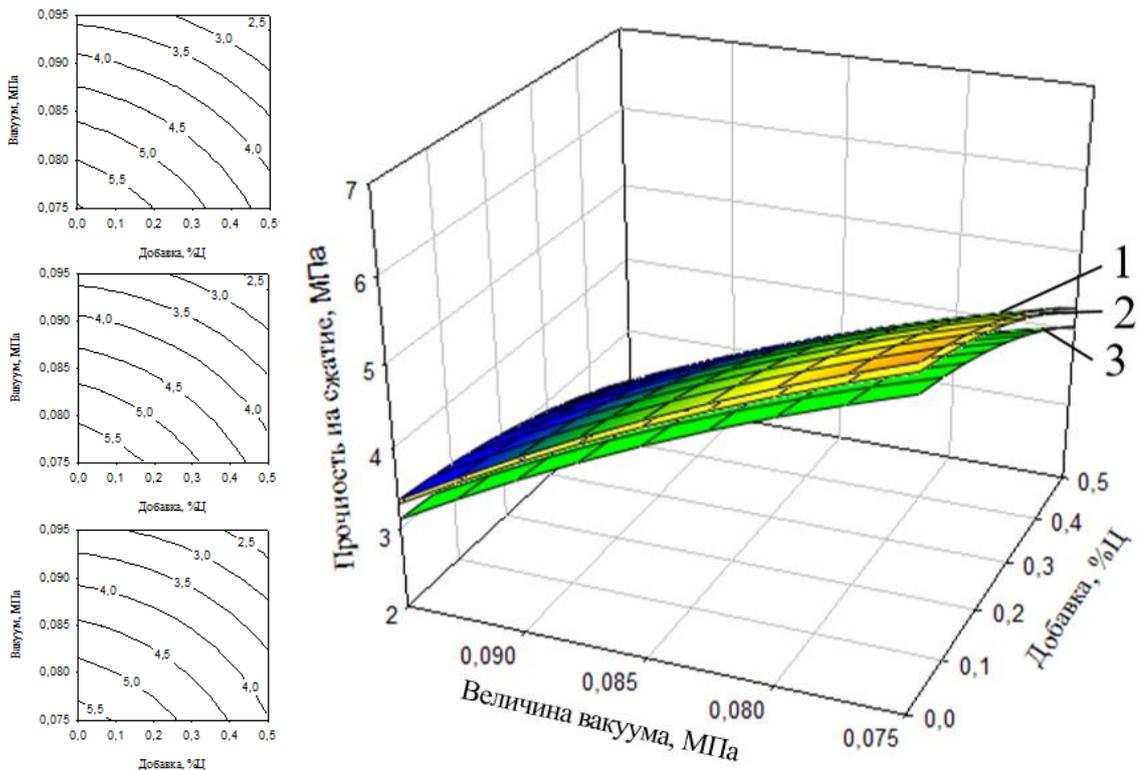


Рисунок 4.9 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – В/Т = 0,35; 2 – В/Т = 0,4; 3 – В/Т = 0,45

При увеличении значения В/Т снижалась вязкость смеси с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС, процесс вспучивания происходил легче, в результате чего уменьшилась средняя плотность материала и прочность на сжатие. При этом увеличение В/Т привело к тому, что вязкость формовочной смеси с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС повышалась, плотность смеси увеличивалась при планомерном падении прочности. При более высоком В/Т избыточная вода снижала силы межчастичного сцепления и разрушала капиллярно-пленочную систему, облегчая газовыделение при термообработке и формируя более развитую пористость. В случае золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС дополнительным фактором являлось присутствие сферических микрочастиц с гладкой поверхностью, которые при повышенном В/Т уменьшали внутреннее трение в суспензии, но при определенных значениях В/Т и изменении соотношения между жидкой и твердой фазами происходило уплотнение системы из-за укладки частиц и частичного связывания воды в гелеобразной фазе гидросиликатов, что приводило к росту вязкости и плотности исходной массы при падении прочности. Это можно объяснить физико-механическими характеристиками золы-уноса – высокими показателями насыпной плотности и удельной поверхности зерен. Соблюдалась закономерность, что каждому режиму термовакуумирования соответствует рациональный состав формовочной смеси, при котором достигается минимальная ее средняя плотность и лучший показатель по прочности на сжатие.

Примененная добавка увеличивает воздухововлечение в бетонную смесь на 3–6 %, способствующая снижению плотности за счет более высокой поризации.

Зависимость средней плотности и прочности неавтоклавногo ячеистого бетона от величины вакуума имело экстремальный характер. В проведенных опытах, в виду применения высоковязких смесей с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС и с низким В/Т, установлено, что при повышении величины вакуума средняя плотность и прочность бетона на сжатие значительно снижаются, поскольку при нарастании

величины вакуума происходит интенсивное и равномерное вспучивание смеси с образованием сферических однородных пор [173].

Полученные математические модели средней плотности и прочности на сжатие термовакуумированного ячеистого бетона использовались для анализа влияния различных технологических факторов на выходные параметры, рационализации состава формовочной смеси, построения номограмм, взаимоувязывающие выходные параметры получаемого материала и все существенно влияющие на них технологические факторы и позволяющие корректировать состав ячеистого бетона неавтоклавного твердения и режим термовакуумирования с целью обеспечения заданных параметров.

4.1.2. Зависимость средней плотности и прочности на сжатие термовакуумированного ячеистого бетона на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС от исследуемых факторов

Технологические параметры производства термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС и его физико-механические свойства получены с использованием математического аппарата. Варьировали основные факторы: водотвердое отношение В/Т (X_1) в пределах от 0,3 до 0,4 с интервалом варьирования 0,05; расход воздухововлекающей добавки Полипласт Аэро 815 (X_2) от 0 до 0,5 % от массы цемента с интервалом варьирования 0,25 и величину вакуума (X_3) от 0,075 до 0,095 МПа с интервалом варьирования 0,01 (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	0,30	0,35	0,40	0,05
Воздухововлекающая добавка «Полипласт Аэро 815», % Ц	X_2	0	0,25	0,5	0,25
Величина вакуума, МПа	X_3	0,075	0,085	0,095	0,01

Факторы, не вошедшие в план эксперимента, приняты постоянными, в том числе температура формовочной смеси $t_{см} = \text{const} = 41 \text{ }^\circ\text{C}$.

Разработана матрица трехуровневого плана с применением экспериментальных данных термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Матрица планирования и экспериментальные данные

№ п/п	Кодированный вид			Экспериментальные данные	
	X_1	X_2	X_3	Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа
1	1	1	1	432	1,9
2	1	1	-1	639	3,7
3	1	-1	1	562	2,6
4	1	-1	-1	831	5,0
5	-1	1	1	398	1,8
6	-1	1	-1	545	3,0
7	-1	-1	1	522	2,1
8	-1	-1	-1	709	4,0
9	1	0	0	443	3,1
10	-1	0	0	596	4,4
11	0	1	0	494	3,0
12	0	-1	0	545	3,6
13	0	0	1	451	2,2
14	0	0	-1	557	4,3
15	0	0	0	491	3,2
16	0	0	0	502	3,6
17	0	0	0	488	3,1

В лабораторных условиях была заформована серия ячеистобетонных образцов размерами 100×100×100 мм. Образцы выдерживали в нормальных условиях твердения в течение 28 сут, по истечении которых определены их физико-механические показатели.

Для получения математических моделей, отражающих связь между выходными параметрами (средней плотностью и прочностью на сжатие) и основными факторами, проводился статистический анализ экспериментальных данных в компьютерных программах, целью которого является оценка

значимости коэффициентов уравнений и проверка адекватности уравнений. В ходе обработки данных были получены коэффициенты уравнений регрессии.

Полученные расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии представлены в таблице 4.7.

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	487	14,3	-65,7	-91,2	32,5	37,5	22	4,75	-18,25	13,25
$R_{сж}$, МПа	3,35	0,18	-0,42	-0,97	0,03	-0,17	-0,22	-0,05	-0,1	0,13

Расчетные значения критерия Стьюдента представлены в таблице 4.8.

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	17,22	0,68	-3,14	-4,36	0,81	0,93	0,54	-0,21	-0,78	0,57
$R_{сж}$, МПа	18,58	1,35	-3,15	-7,27	0,13	-0,64	-0,84	-0,36	-0,67	0,84

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

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

$$\rho_{ср} = 487 + 14,3 \cdot X_1 - 65,7 \cdot X_2 - 91,2 \cdot X_3 + 32,5 \cdot X_1^2 + 37,5 \cdot X_2^2 + 22 \cdot X_3^2 - 4,75 \cdot X_1 \cdot X_2 - 18,25 \cdot X_1 \cdot X_3 + 13,25 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.18)$$

$$R_{сж} = 3,35 + 0,18 \cdot X_1 - 0,42 \cdot X_2 - 0,97 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_1^2 - 0,17 \cdot X_2^2 - 0,22 \cdot X_3^2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,13 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (4.19)$$

Адекватность моделей (оценка адекватности проводилась по критерию Фишера) позволяет определять параметры изготовления изделий с марками по средней плотности.

Построены зависимости прочности на сжатие и средней плотности термовакuumированного неавтоклавного ячеистого бетона от В/Т, количества воздухововлекающей добавки и величины вакуума (рисунки 4.10–4.12).

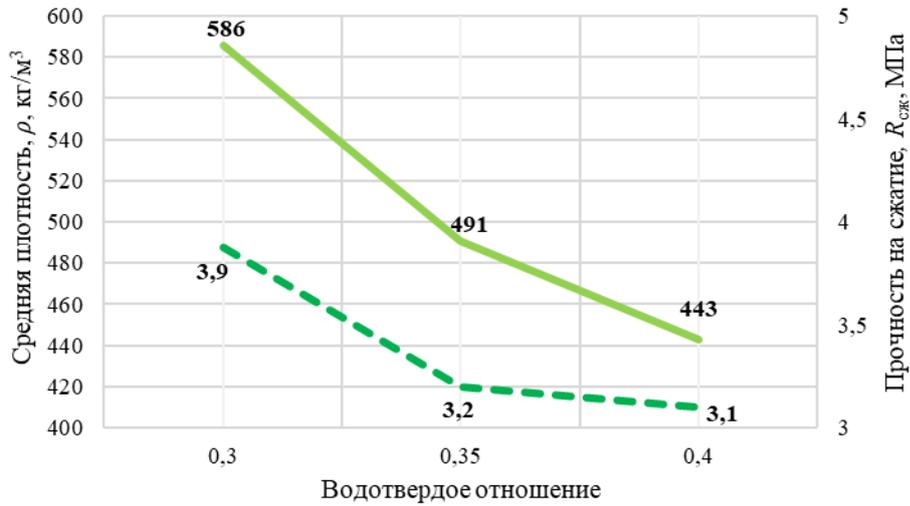


Рисунок 4.10 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие ($R_{сж}$) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от водотвердого отношения: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

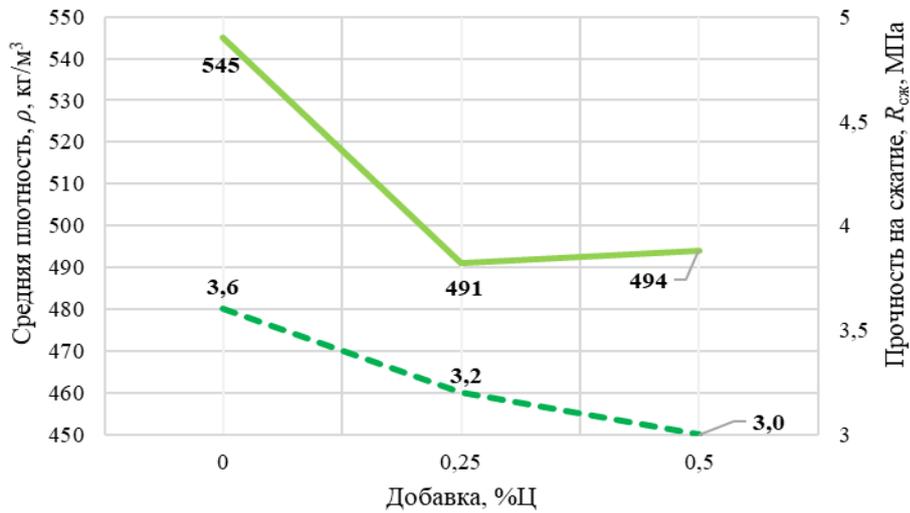


Рисунок 4.11 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие ($R_{сж}$) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от расхода добавки: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

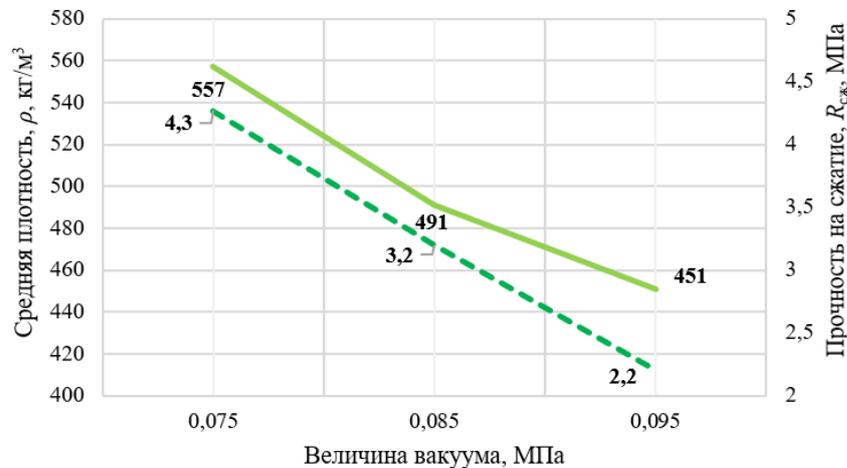


Рисунок 4.12 – Зависимости средней плотности (ρ) и прочности на сжатие ($R_{сж}$) термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения от величины вакуума: — средняя плотность, кг/м³; - - - прочность на сжатие, МПа

Комплексное представление о влиянии В/Т, воздухововлекающей добавки и давления вакуума на выходные параметры термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения на различных кремнеземистых компонентах отражено в графической интерпретации – номограммах зависимостей выходных параметров от совокупности исследуемых факторов (рисунок 4.13–4.18).

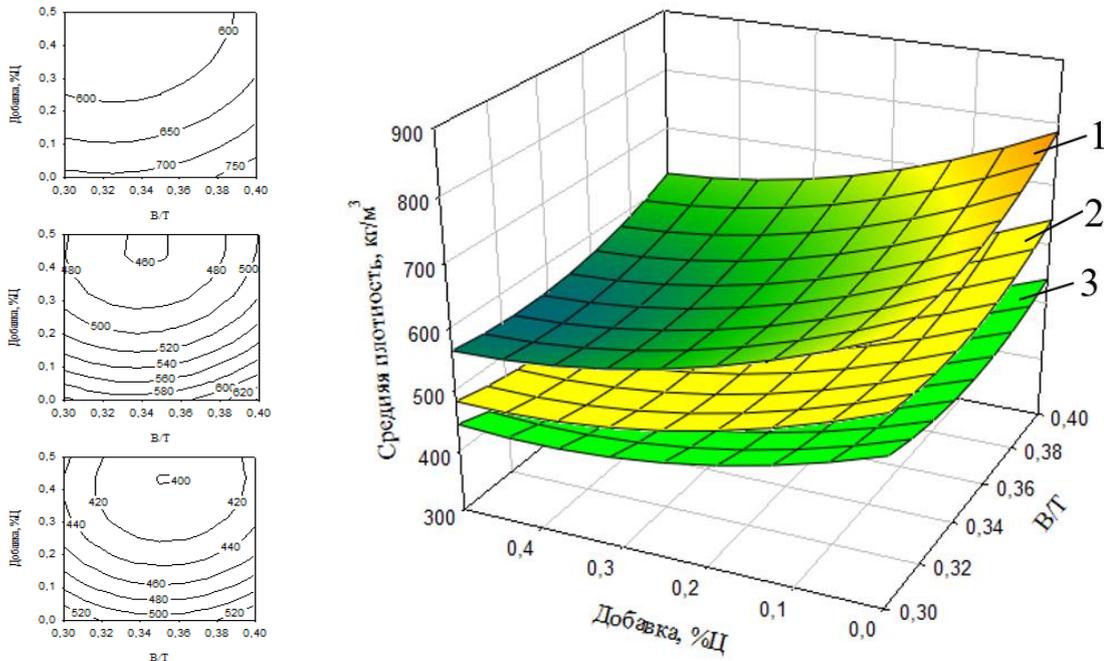


Рисунок 4.13 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – вакуум = 0,075 МПа; 2 – вакуум = 0,085 МПа; 3 – вакуум = 0,095 МПа

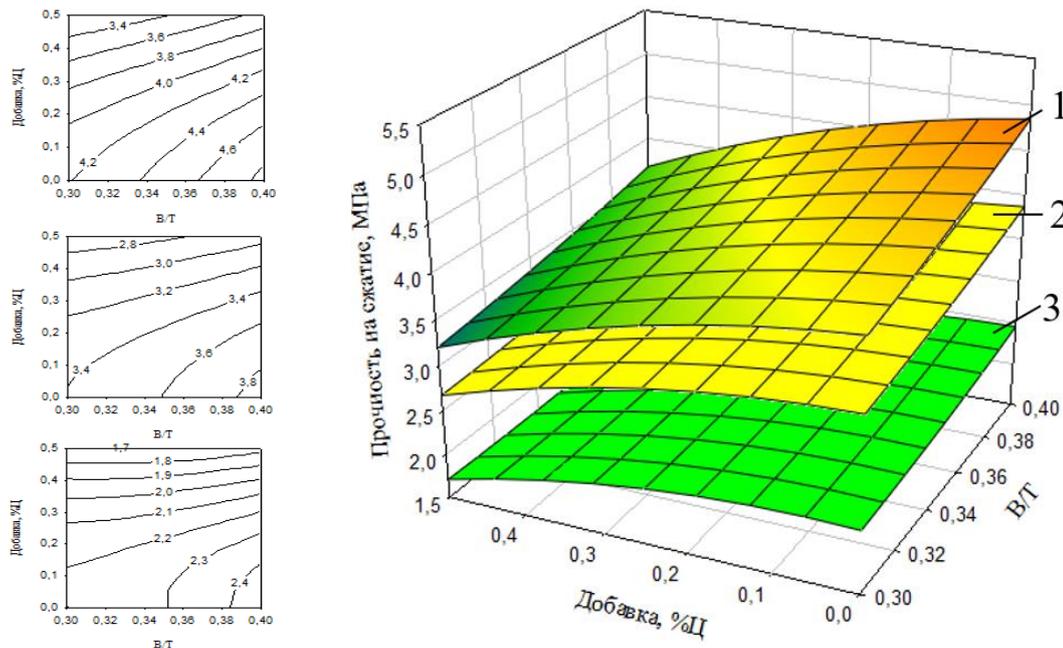


Рисунок 4.14 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – вакуум = 0,075 МПа; 2 – вакуум = 0,085 МПа; 3 – вакуум = 0,095 МПа

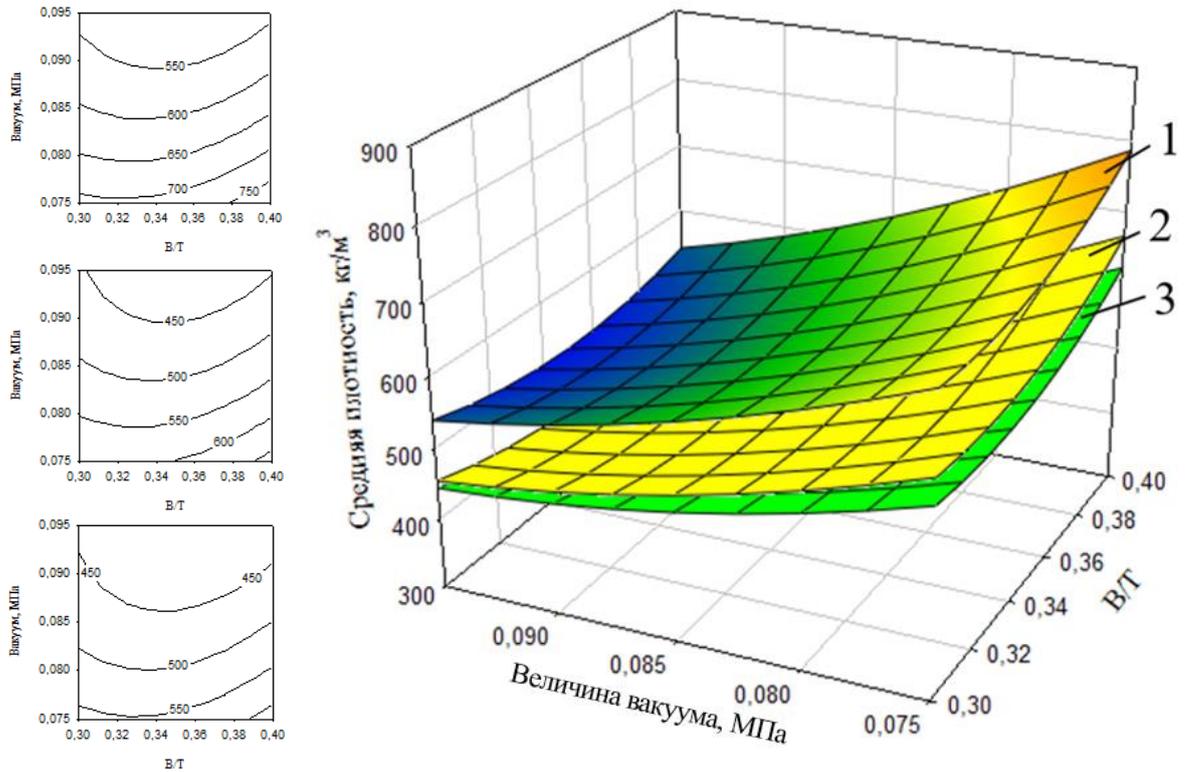


Рисунок 4.15 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – добавка = 0 % от Ц; 2 – добавка = 0,25 % от Ц; 3 – добавка = 0,5 % от Ц

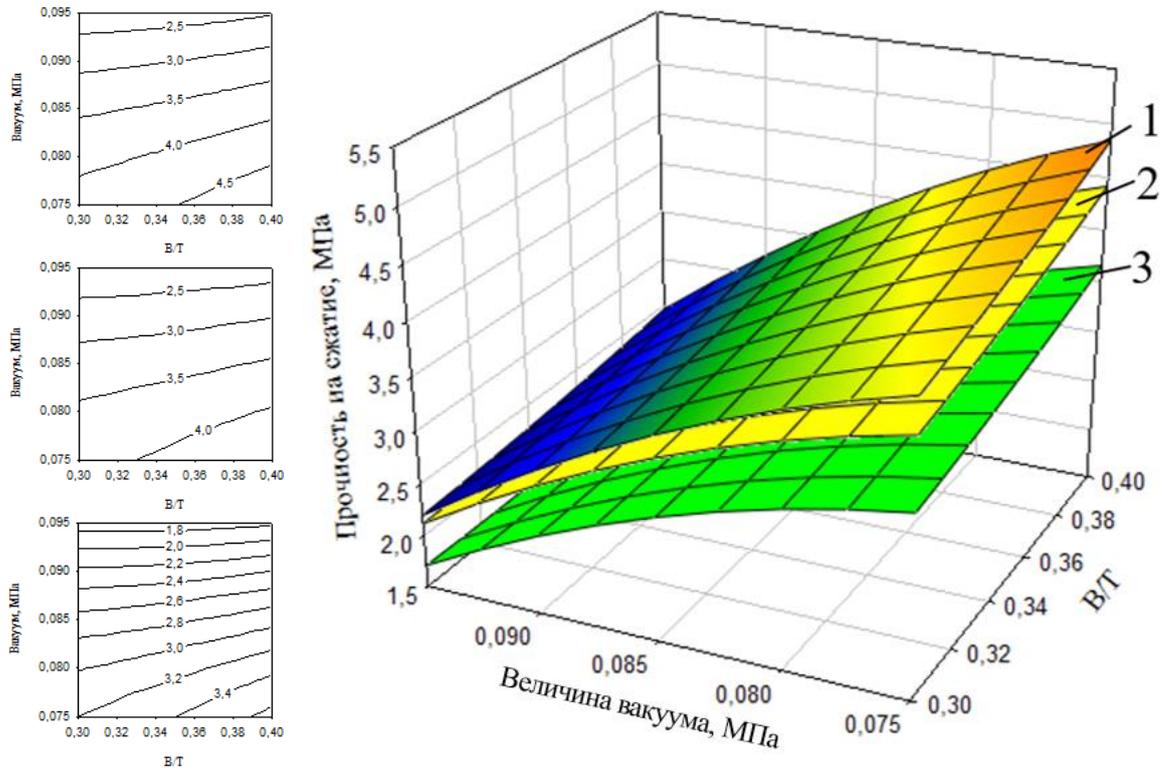


Рисунок 4.16 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – добавка = 0 % от Ц; 2 – добавка = 0,25 % от Ц; 3 – добавка = 0,5 % от Ц

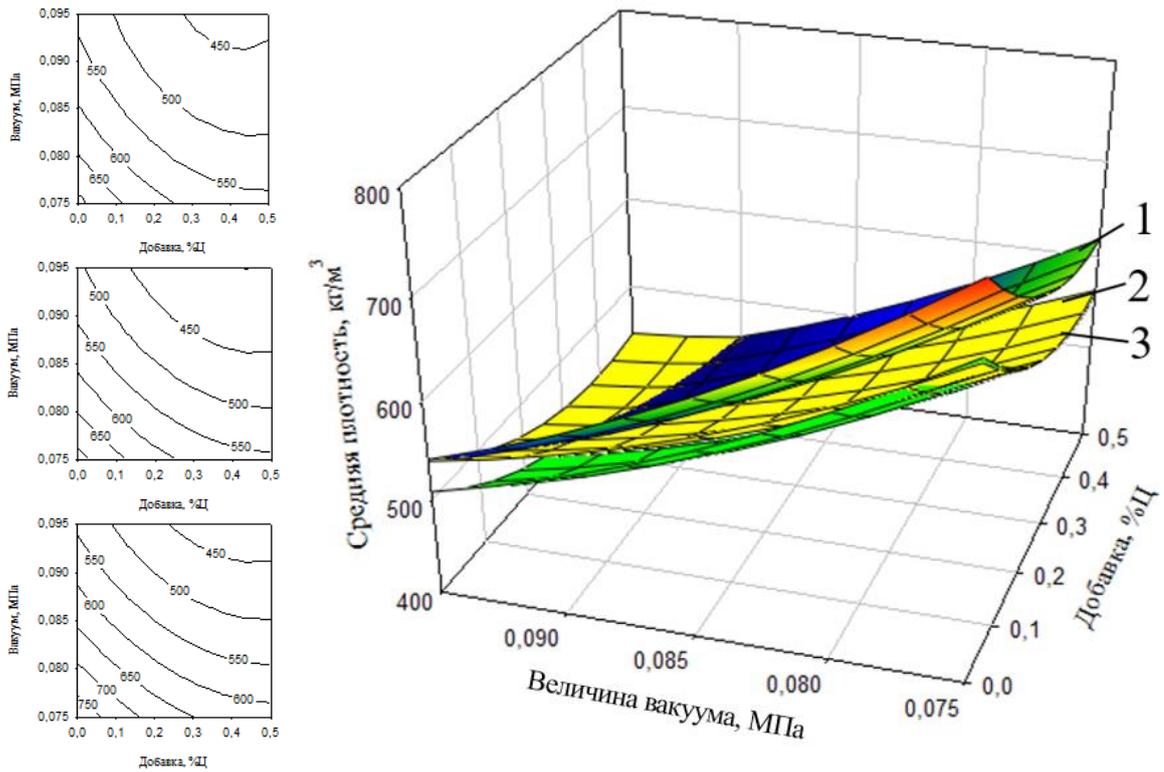


Рисунок 4.17 – Номограммы зависимостей средней плотности термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,35; 3 – В/Т = 0,4

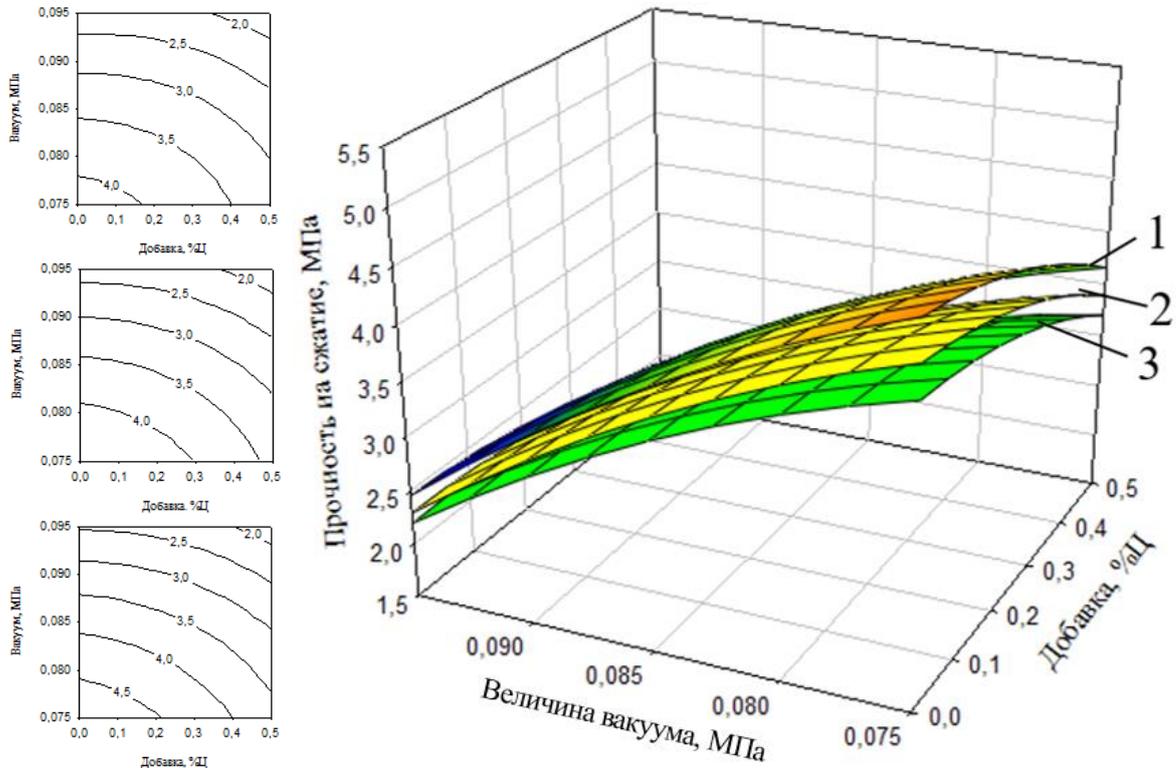


Рисунок 4.18 – Номограммы зависимостей прочности на сжатие термовакuumированного ячеистого бетона с применением золы-уноса Рефтинской ГРЭС от В/Т, расхода добавки и величины вакуума: 1 – В/Т = 0,3; 2 – В/Т = 0,35; 3 – В/Т = 0,4

Из данных, представленных на номограммах, видно, что при низких значениях В/Т исходные формовочные массы с золой-уноса Рефтинской ГРЭС достаточно жесткие, что отрицательно сказалось на процесс вспучивания – наблюдается недовспучивание смесей, в следствие чего материал получился более плотным и прочным. При увеличении значения В/Т снижалась вязкость смеси с золой-уноса Рефтинской ГРЭС, процесс вспучивания происходил легче, в результате чего уменьшилась средняя плотность материала и прочность на сжатие. При этом увеличение В/Т привело к тому, что вязкость формовочной смеси с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС повышалась, плотность смеси увеличивалась при планомерном падении прочности, что можно объяснить физико-механическими характеристиками золы-уноса. Соблюдалась закономерность, что каждому режиму термовакuumирования соответствует рациональный состав формовочной смеси, при котором достигается минимальная ее средняя плотность и лучший показатель по прочности на сжатие.

Примененная добавка увеличивает воздухововлечение в бетонную смесь на 3–6 %. Поэтому чем больше ее в формовочной смеси, тем ниже средняя плотность и прочность получаемого материала.

Зависимость средней плотности и прочности неавтоклавного ячеистого бетона от величины вакуума имело экстремальный характер. В проведенных опытах, в виду применения высоковязких смесей с разными видами золы-уноса и с низким В/Т, установлено, что при повышении величины вакуума средняя плотность и прочность бетона на сжатие значительно снижаются, поскольку при увеличении вакуума происходит интенсивное и равномерное вспучивание смеси с образованием сферических однородных пор.

Полученные математические модели средней плотности и прочности термовакuumированного ячеистого бетона использовались для анализа влияния различных технологических факторов на выходные параметры, рационализации состава формовочной смеси, построения номограмм, взаимоувязывающие выходные параметры получаемого материала и все существенно влияющие на них технологические факторы и позволяющие корректировать состав ячеистого

бетона неавтоклавного твердения и режим термовакуумирования с целью обеспечения заданных параметров [173].

Полученные номограммы позволяют поддерживать на заданном уровне выходные параметры, изменяя соответствующим образом основные технологические параметры.

4.2. Физико-механические свойства термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

На основании проведенных исследований п. 4.1 были разработаны рациональные составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения для марок по средней плотности $D400$, $D500$ и $D600$. Составы представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Номер состава	Цемент, кг/м ³	Зола-уноса Рефтинской ГРЭС, кг/м ³	Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС, кг/м ³	Полипласт Аэро 815, кг/м ³	Вода, л	В/Ц
1	270	120	-	0,6	155	0,57
2	270	190	-	0,7	160	0,59
3	300	-	160	0,8	165	0,55
4	320	180	-	0,9	175	0,55

Определены физико-механические характеристики разработанных составов.

Методика оценки морозостойкости ячеистого бетона реализована в соответствии с требованиями ГОСТ 25485. Для проведения испытаний от каждой серии образцов были отобраны 24 кубических фрагмента с геометрическими параметрами 100×100×100 мм. Процедура насыщения влагой включала поэтапное погружение образцов: первичное – на 1/3 высоты с экспозицией 8 ч, вторичное – на 2/3 высоты с аналогичной выдержкой, финальное – полное погружение на 24 ч. Основные образцы, предназначенные для анализа изменения прочностных и массовых характеристик после циклического замораживания-оттаивания, предварительно взвешивались и размещались в климатической камере с температурным режимом –18 °С.

Цикл испытаний состоял из 4-часовой криостатической фазы (замораживание) и 18-часовой термостатической фазы (оттаивание) при температуре $+18 \pm 2$ °С и относительной влажности 90 %. Контроль состояния образцов осуществлялся визуально и посредством механических испытаний на сжатие после каждых 5 циклов. Критерием соответствия марки ячеистого бетона установленным нормативам являлось сохранение прочности (допустимое снижение ≤ 15 %) и массы (потеря ≤ 5 %) после заданного числа циклов. Экспериментально подтверждено, что образцы ячеистого бетона сохранили целостность структуры после 35–75 циклов, что позволило присвоить материалу марку морозостойкости *F35–F75*.

Теплофизические характеристики ячеистого бетона в сухом состоянии исследованы согласно ГОСТ 7076-99. Установлено, что коэффициент теплопроводности материала коррелирует с его средней плотностью и морфологией поровой структуры, соответствуя нормам ГОСТ 25485-2019.

Паропроницаемость образцов ячеистого бетона определена по методике ГОСТ 25898-2020 на образцах $100 \times 100 \times 30$ мм. Полученные значения коэффициента паропроницаемости подтвердили соответствие материала требованиям по сопротивлению диффузии водяного пара.

Водопоглощение по массе всех составов находится в пределах 12–17 %, что соответствует требованиям для ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. Составы на основе золы-уноса показали несколько меньшие значения водопоглощения благодаря пуццолановой активности кремнеземистого компонента и формированию более плотной структуры межпоровых перегородок.

Изучение усадочных деформаций выполнено в соответствии с ГОСТ 25485. Для испытаний использовались три призматических образца размером $40 \times 40 \times 160$ мм, изготовленных методом распиловки контрольных ячеистобетонных блоков. Предварительная кондиционизация образцов проводилась в герметизированных эксикаторах с поддержанием влажностного режима над поверхностью воды. Метрические измерения усадки осуществлялись с использованием индикатора

часового типа, закрепленного на стальных реперах, смонтированных на торцевых гранях образцов. Критерием завершения эксперимента являлась стабилизация массовых и линейных параметров образцов в условиях естественной сушки.

Результаты комплексных испытаний физико-механических свойств разработанных составов ячеистого бетона представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Физико-механические свойства разработанных составов термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Номер состава	Средняя плотность, кг/м ³	Марка по средней плотности	Прочность на сжатие, МПа	Класс по прочности	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Марка по морозостойкости	Водопоглощение, %	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Усадка, мм/м
1	398	D400	1,8	B1,5	0,068	F35	15	0,20	1,2
2	502	D500	3,6	B2,5	0,086	F50	14	0,17	1,0
3	497	D500	3,5	B2,5	0,092	F50	16	0,17	0,9
4	596	D600	4,4	B3,5	0,108	F75	12	0,13	0,9

Анализ полученных результатов показывает, что все составы соответствуют требованиям ГОСТ 25485-2019 для соответствующих марок по средней плотности и превышают минимальные нормативные значения прочности на 15–25 %. Полученные результаты подтверждают эффективность применения термовакуумирования для получения ячеистых бетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками. Разработанные составы обеспечивают получение материала с сочетанием прочности, теплоизоляционных свойств и долговечности для различных условий эксплуатации.

4.3. Исследование микроструктуры термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Анализ микроструктуры серии термовакуумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения, проведенный методом сканирующей электронной микроскопии, выявил прямую зависимость между рецептурой композита,

формирующейся гидратной фазой и итоговыми макроскопическими свойствами материала. Исследование позволило установить принципиальные различия в архитектуре порового пространства.

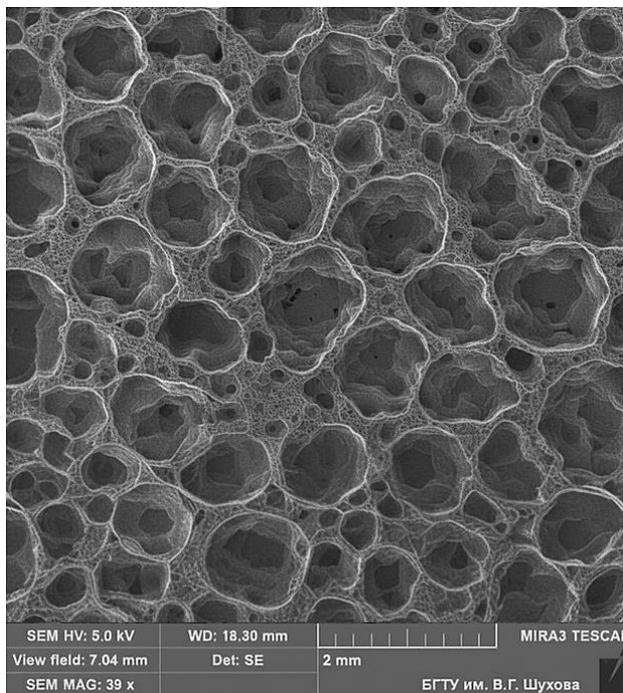


Рисунок 4.19 – Микроструктура термовакуумированного ячеистого бетона марки по средней плотности $D400$

В образце марки по средней плотности $D400$ (рисунок 4.19) наблюдается характерная для ячеистых бетонов структура с замкнутыми сферическими порами. Равномерное распределение макропор диаметром 0,1–0,6 мм свидетельствует о стабильном процессе порообразования. Межпоровые перегородки толщиной 60–120 мкм сложены преимущественно аморфным С-S-H гелем, выступающим основным связующим компонентом, и редкими пластинчатыми кристаллами

портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ключевую роль в уплотнении матрицы играют частицы золы-уноса, которые, оставаясь химически инертными, действуют как микрозаполнитель, эффективно заполняя пространство и снижая капиллярную пористость до 15–18 %. Локализация микропор размером 1–5 мкм в гелевой фазе указывает на высокую степень гидратации цемента.

При переходе к более плотному составу марок по средней плотности $D500$ (рисунок 4.20) формируется иерархическая поровая структура. Помимо макропор (0,15–0,7 мм), появляется значительное количество мезопор (5–20 мкм), что указывает на более плотную упаковку твердой фазы. Межпоровые перегородки толщиной 100–180 мкм состоят из плотного С-S-H геля тоберморитового типа, а частицы золы-уноса (10–40 мкм) выполняют функцию дисперсного армирования, механически упрочняя матрицу. Равномерно распределенная капиллярная пористость ($\leq 16\%$) является ключом к сбалансированным свойствам.

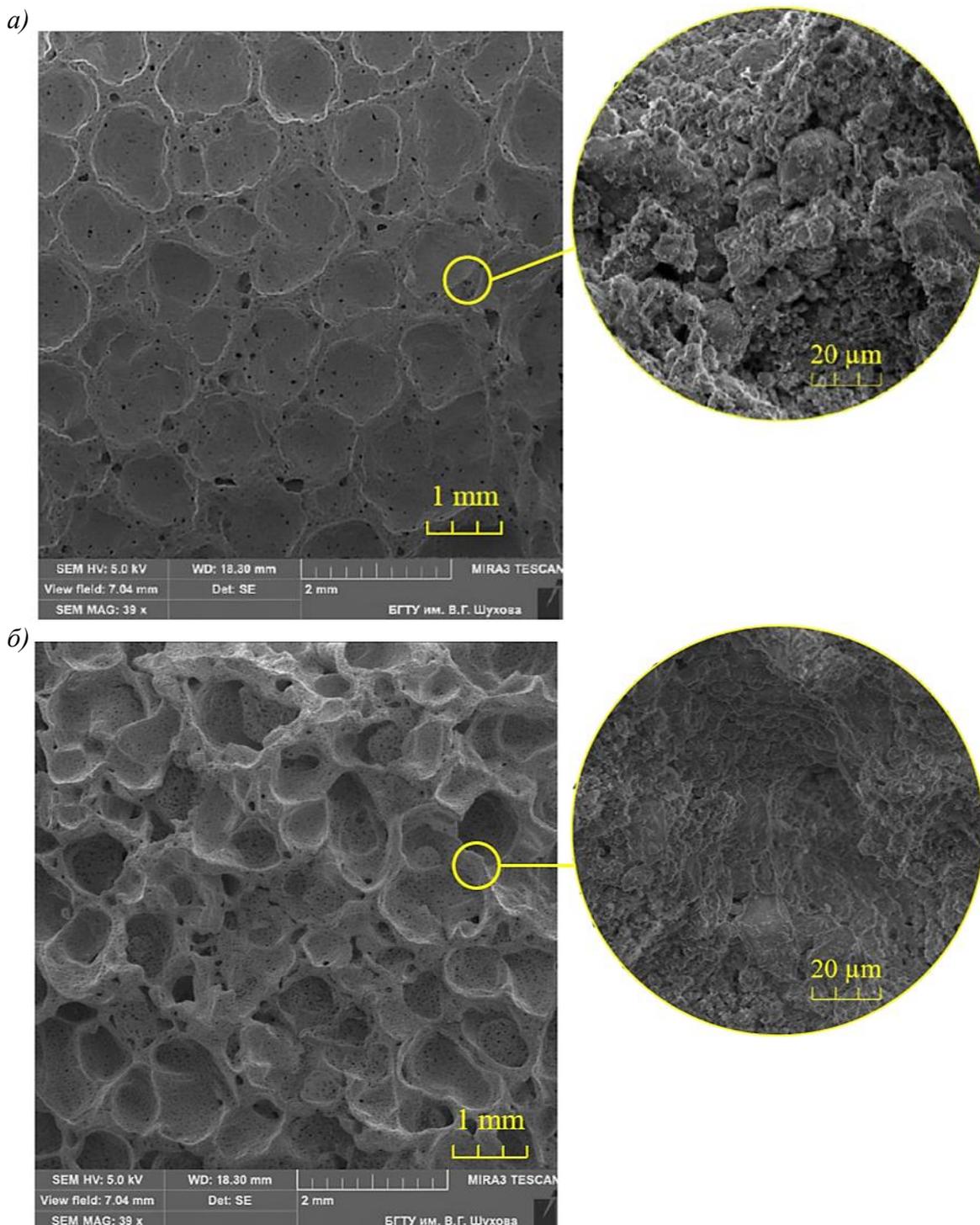


Рисунок 4.20 – Микроструктура термовакуумированного ячеистого бетона марки по средней плотности $D500$: *a* – с золой-уноса Рефтинской ГРЭС; *б* – с золой-уноса Гусиноозерской ГРЭС

Образец марки по средней плотности $D600$ (рисунок 4.21) демонстрирует максимальную плотность матрицы среди составов с золой-уноса. Перегородки толщиной 150–250 мкм представляют собой монолитный конгломерат из С-S-H геля и крупных, хорошо сформированных кристаллов портландита (10–25 мкм).

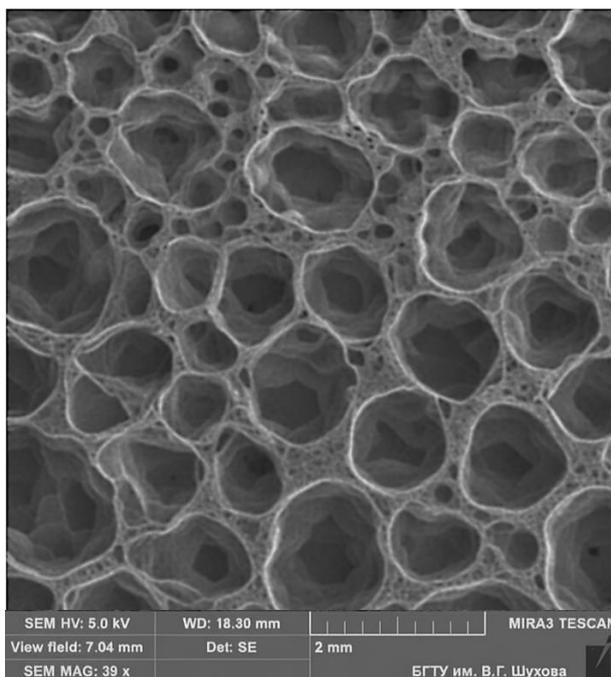


Рисунок 4.21 – Микроструктура термовакуумированного ячеистого бетона марки по средней плотности $D600$

Низкая доля макропор (<12%) и минимальная капиллярная пористость (12–14 %) достигаются за счет эффекта уплотнения инертным заполнителем.

Важными структурными элементами во всех образцах являются переходные зоны на границе «воздушная пора – матрица» толщиной 3–12 мкм. Эти зоны, обогащенные плотными гидратами и частицами заполнителя, выступают в роли буфера, препятствующего концентрации напряжений и развитию микротрещин, что существенно

повышает долговечность материала.

4.4. Пористость термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения и ее определяющие факторы

Пористость термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения представляет собой многокомпонентную систему, включающую различные категории пор, формирующиеся под воздействием контролируемых технологических режимов. Исследование структурных характеристик образцов с плотностью 400, 500 и 600 кг/м³ показывает, что общая пористость (P_{tot}) материала варьируется в диапазоне 75,0–83,3 %, при этом ее структурная организация существенно зависит от параметров термовакуумной обработки и состава исходной смеси [174].

Общая пористость термовакуумированного ячеистого бетона определяется по формуле $P_{tot} = (1 - D/\rho_{ck}) \cdot 100$, где D – средняя плотность материала; $\rho_{ck} = 2400$ кг/м³ – истинная плотность твердой фазы. Структурный анализ показывает, что пористость подразделяется на три основные категории:

макропоры (P_{macro}), капиллярные поры (P_{cap}), гелевые поры (P_{gel}), связанные соотношением:

$$P_{macro} = P_{tot} - P_{cap} - P_{gel}. \quad (4.20)$$

Расчет отдельных компонентов пористости осуществляется с учетом расхода воды, степени гидратации (α), расхода цемента и эмпирических коэффициентов. Результат расчета представлен на рисунке 4.22.

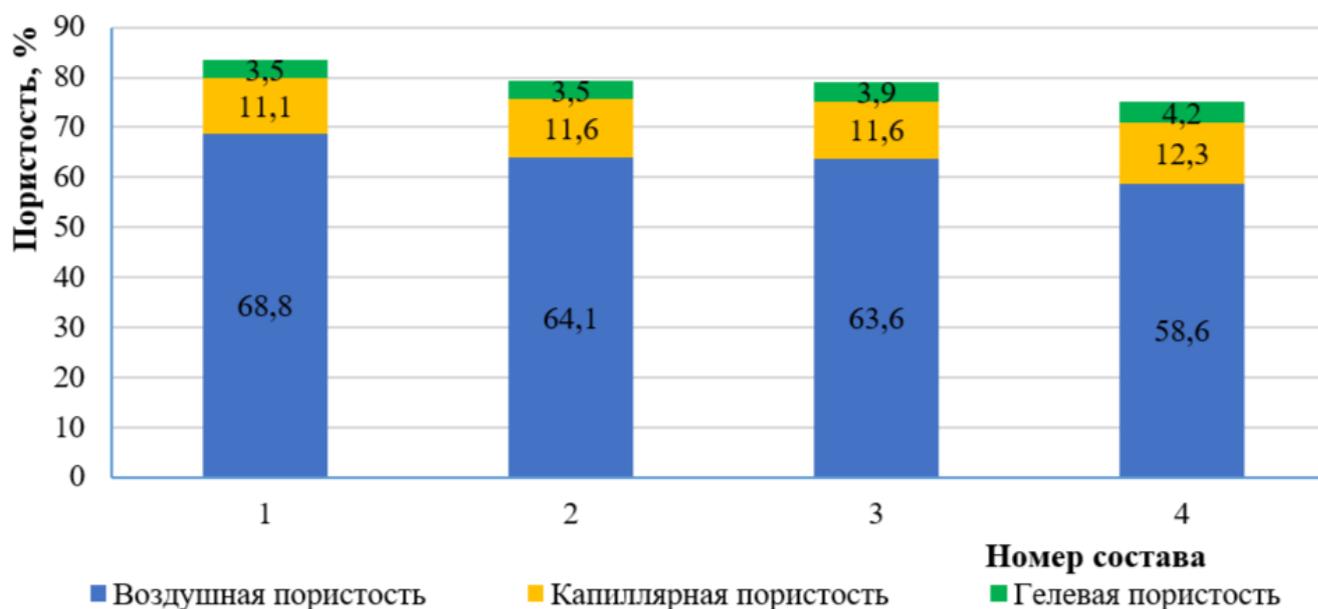


Рисунок 4.22 – Пористость термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Макропористость составляет доминирующую часть порового пространства, достигая 55,9–67,0 % от общего объема пор. В образцах с плотностью 400 кг/м³ макропоры занимают 66,4–67,0 %, что обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства материала при сохранении необходимой механической прочности. С увеличением плотности до 600 кг/м³ доля макропор снижается до 55,9–56,5 %, что свидетельствует о технологическом уплотнении структуры и перераспределении порового объема в пользу мелких пор. Капиллярная пористость варьируется от 11,1 до 12,3 %, демонстрируя тенденцию к увеличению с ростом плотности материала, что связано с интенсификацией процессов гидратации цемента при термовакuumной обработке.

Гелевая пористость изменяется в диапазоне 3,5–4,4 %, показывая устойчивый рост с увеличением плотности бетона. Это явление объясняется формированием более развитой системы гидратных новообразований в межпоровых перегородках при повышенной концентрации вяжущих веществ.

Определяющими факторами формирования пористости являются технологические параметры термовакуумирования, включающие температурный режим обработки, длительность и глубину вакуумного воздействия, а также состав исходной смеси. Вакуумирование при давлении 0,085–0,095 МПа способствует удалению воздуха из структуры и интенсификации процессов газообразования за счет снижения внешнего давления над поризуемой смесью. Термическое воздействие ускоряет реакции гидратации и способствует формированию стабильной пористой структуры за счет упрочнения межпоровых перегородок.

Толщина межпоровых перегородок, рассчитываемая по методу Хархардина [175] с поправкой для высокопористых систем $\delta = 0,25 \cdot \frac{100 - P_{tot}}{P_{tot}} \cdot 1000$, варьируется от 50 мкм для образцов плотностью 400 кг/м³ до 83 мкм для образцов плотностью 600 кг/м³. Средний диаметр пор уменьшается с 0,80 мм до 0,60 мм при увеличении плотности материала, что отражает трансформацию пористой структуры в направлении более мелких и равномерно распределенных пор. Коэффициент формы пор составляет 1,25 для всех составов, указывая на преимущественно сферическую форму макропор с незначительными деформациями.

Влияние типа минерального заполнителя проявляется в различиях морфологии пористой структуры между составами с золой-уноса. Составы с золой-уноса характеризуются более однородной макроструктурой с преобладанием крупных пор и компактной упаковкой твердых фаз.

Анализ распределения пор по размерам показывает характерные особенности для каждой группы плотности (рисунок 4.23). Состав марки по средней плотности D400 (состав 1) демонстрирует выраженный пик при диаметрах 0,5–0,6 мм, что соответствует максимуму распределения макропор.

Для составов марки по средней плотности $D500$ (составы 2 и 3) наблюдается смещение максимумов к диаметрам 0,7–0,8 мм с более равномерным распределением и увеличением частоты пор среднего размера. Наиболее плотные состав с маркой по средней плотности $D600$ (состав 4) характеризуются концентрацией основного распределения в зоне 0,95–1,1 мм, что приводит к формированию сложной системы каналоподобных и сетчатых пор.

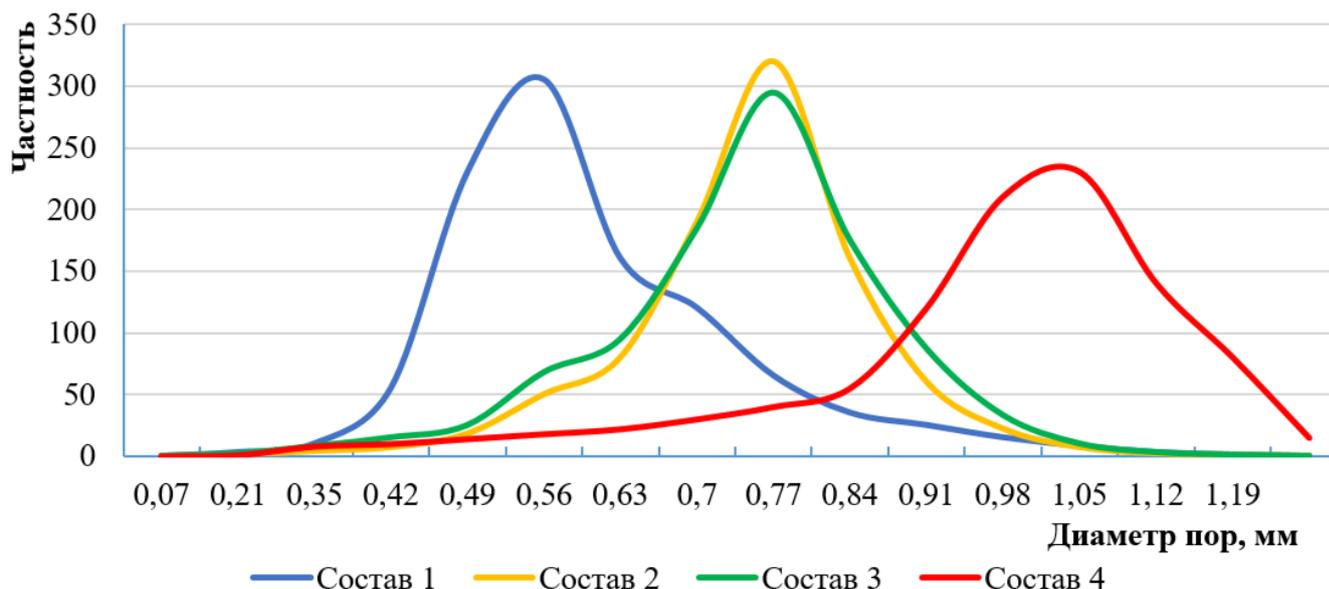


Рисунок 4.23 – Распределение пор по размерам для составов термовакuumированного ячеистого бетона различной плотности

Механизм формирования пористой структуры включает последовательные этапы: первичное газообразование при взаимодействии алюминиевой пудры со щелочной средой, рост и стабилизацию газовых пузырьков в вязкопластичной массе, термовакuumное удаление избыточной влаги и воздуха, а также окончательное формирование пористого каркаса при твердении цементной матрицы. Установленные параметры процесса обеспечивают снижение водоцементного отношения до 0,3–0,4 при сохранении необходимой пористости смеси за счет вакуумного воздействия.

Корреляционный анализ структурных параметров показывает обратную зависимость между общей пористостью и плотностью материала с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,95$, что подтверждает высокую предсказуемость свойств термовакuumированного ячеистого бетона.

Установленные закономерности позволяют осуществлять направленное регулирование пористой структуры путем варьирования параметров термовакuumной обработки и состава исходной смеси для получения материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Таким образом, пористость термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения представляет собой контролируемую многоуровневую систему, формирующуюся под воздействием технологических факторов термовакuumирования. Подбор параметров обработки позволяет управлять структурно-функциональным распределением пор, обеспечивая необходимый баланс между теплоизоляционными и прочностными характеристиками при минимальной плотности материала. Полученные количественные закономерности служат основой для разработки научно обоснованных технологических режимов производства высокоэффективных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения.

4.5. Выводы

1. Определены закономерности воздействия рецептурных параметров – водотвердого отношения, расхода воздухововлекающей добавки Полипласт Аэро 815 и величины разряжения – на среднюю плотность и прочность при сжатии термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, что обеспечивает возможность регулирования процесса получения эффективного строительного материала.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана целесообразность использования термовакuumирования для производства ячеистых бетонов марок по средней плотности $D400$ – $D600$ с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) свойствами. Оптимизированные составы обеспечивают получение материала с требуемым сочетанием прочности, теплозащитных характеристик и долговечности, что позволяет применять его в разнообразных эксплуатационных условиях.

3. Исследованы изменения физико-механических и эксплуатационных свойств термовакuumированного ячеистого бетона в зависимости от содержания исходных компонентов в составе смеси.

4. Микроструктурные исследования позволили выявить основные закономерности формирования пористой структуры ячеистого бетона. Образцы отличаются равномерными замкнутыми поровыми структурами с тонкостенными межпоровыми перегородками из аморфного C-S-H геля и пониженной капиллярной пористостью. При росте средней плотности образцов происходит формирование многоуровневой структуры и возрастает доля мезопор, а уплотнение цементно-зольной матрицы обеспечивается частицами золы-уноса в качестве микрозаполнителя, способствующего механическому усилению межпоровых перегородок.

5. На основании выполненных исследований структурных характеристик образцов со средней плотностью 400–600 кг/м³ установлено, что общая пористость материала изменяется в пределах 75,0–83,3 %, при этом ее структурная организация в значительной степени определяется параметрами термовакuumной обработки и составом исходной смеси.

6. Исследование распределения пор по размерам выявляет специфические особенности для каждой группы средней плотности. Состав марки по средней плотности *D400* характеризуется ярко выраженным максимумом при диаметрах 0,5–0,6 мм, что соответствует пику распределения макропор. Для составов марки по средней плотности *D500* отмечается смещение максимумов к диаметрам 0,7–0,8 мм с более однородным распределением и увеличением доли пор среднего размера. Наиболее плотный состав с маркой по средней плотности *D600* отличается концентрацией основного распределения в области 0,95–1,1 мм, что обуславливает формирование сложной системы каналоподобных и сетчатых пор.

5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОВАКУМИРОВАННОГО ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ И ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1. Разработка технологической схемы производства изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

Производство изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения представляет собой инновационный технологический процесс, объединяющий традиционные принципы изготовления ячеистых бетонов с современными методами термовакuumной обработки. Основными компонентами формовочной смеси являются портландцемент, зола-уноса как минеральный наполнитель, вода затворения и воздухововлекающая добавка. Особенностью технологии является применение синергетического воздействия температурного режима и вакуумирования на структурообразование материала, что позволяет получить изделия с улучшенными прочностными и теплотехническими характеристиками.

Организация технологического процесса производства термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с применением сырьевых материалов и систем автоматизированного управления может быть реализована согласно разработанной технологической схеме, представленной на рисунке 5.1.

Подготовка исходных материалов. На начальном этапе технологического процесса проводится подготовка и загрузка резервуаров необходимыми компонентами для формирования формовочной смеси. Сырьевые материалы, используемые в производстве термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, должны соответствовать требованиям нормативных документов Российской Федерации, регламентирующих свойства ячеистых бетонов, а также соответствовать требованиям стандартов. Контроль свойств исходных материалов является необходимым требованием технологического процесса.

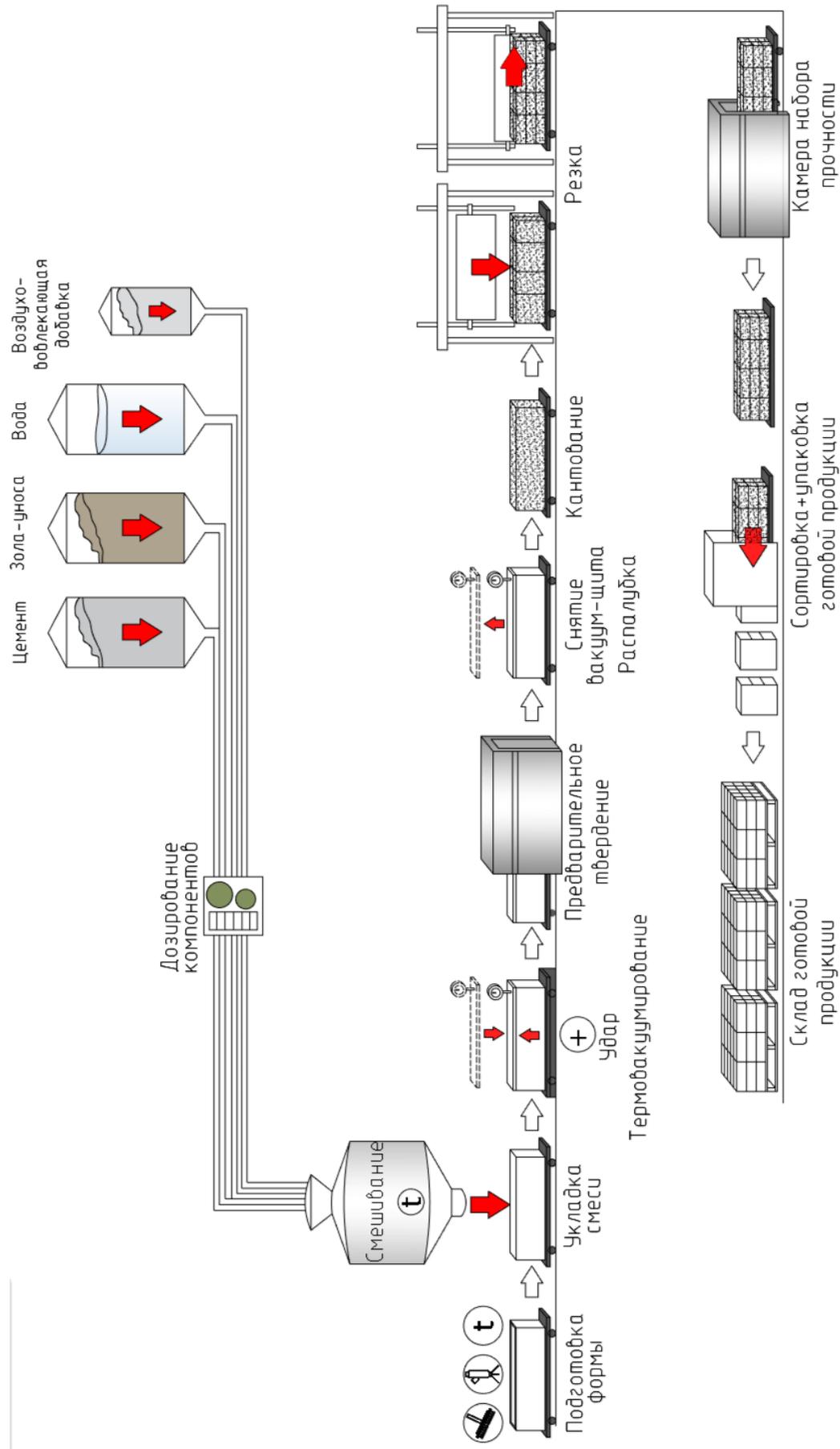


Рисунок 5.1 – Технологическая схема производства изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неармированного

Перед укладкой смеси осуществляется тщательная подготовка формы, включающая установку поддонов, их очистку от остатков предыдущих циклов производства и нанесение разделительной смазки для предотвращения адгезии затвердевшего материала к поверхности формы (рисунок 5.2). Установка бортоснастки и подогрев формы создают необходимые условия для равномерного распределения смеси и поддержания заданного температурного режима в начальный период структурообразования.



Рисунок 5.2 – Технологическая схема подготовки формы

Смешивание компонентов. Формирование требуемого температурного режима в процессе приготовления смеси осуществляется путем одновременной подачи в смеситель холодной и горячей воды, при этом автоматическая система регулирования, снабженная датчиками, фиксирует и обеспечивает поддержание требуемого значения температуры смеси. После этого в смеситель вводят такие основные компоненты, как цемент, зола-уноса и жидкая добавка. Важно учитывать, что температура цемента может изменяться в зависимости от времени года, что требует учета при подборе параметров водного баланса холодной и горячей воды и настройки оборудования для достижения устойчивых характеристик температуры раствора. После завершения дозирования все компоненты направляются в турбулентный смеситель, где реализуется процесс гомогенизации смеси. Поддерживаемые тепловые режимы на данном этапе имеют ключевое значение: температура воды затворения удерживается на уровне 59 °С, что способствует активизации процессов гидратации цемента и значительно повышает реакционную способность пуццолановых составляющих золы-уноса.

Дополнительно предусмотрен предварительный нагрев формы до 55 °С, благодаря чему удастся обеспечить сохранение температуры смеси в пределах

39–43 °С в момент заливки, что является необходимым условием для протекания первых стадий структурообразования материала. Все ингредиенты подвергаются интенсифицированному перемешиванию в течение 50 с, что гарантирует достижение высокой степени однородности состава и равномерное распределение твердых и жидких компонентов в объеме смеси. На выходе промежуточный продукт проходит контроль качества, который реализуется посредством отбора проб.

Формирование пористой структуры. Готовая смесь после перемешивания укладывается в подготовленную и разогретую форму, где происходит естественный процесс вспучивания продолжительностью 90 с. Поризация смеси происходит за счет действия воздухововлекающей добавки, которая создает стабильную систему мелкодисперсных воздушных пор в объеме формовочной массы. Механизм поризации основан на снижении поверхностного натяжения жидкой фазы и образовании устойчивых воздушных пузырей, равномерно распределенных в структуре материала.

Термовакuumная обработка. Ключевым этапом технологического процесса является термовакuumная обработка сформованной массы, где реализуется комбинированное воздействие пониженного давления и ударного уплотнения. Поддон с формой перемещается на ударный стол, форма накрывается металлическим вакуум-щитом. Одновременное применение вакуумирования и удара снизу формы способствует формированию однородной пористой структуры. Удар продолжительностью 30 с, в начальный период создания давления вакуума, обеспечивает изменение реологических характеристик смеси и улучшает контакт между частицами цементной матрицы, исключая образование крупных дефектов и обеспечивая монолитность структуры. Процесс вакуумирования осуществляется при вакууме 0,085–0,095 МПа, что создает условия для расширения газовых пор с компенсацией сил тяжести и инерции.

Предварительное твердение. Форма подается в тоннельную камеру предварительного твердения при сохранении вакуумного воздействия под вакуум-щитом. Перекрытие основного вакуумного канала происходит с

сохранением вакуум-щита на форме, что поддерживает постоянное давление вакуума в пределах 0,085–0,095 МПа. Время выдерживания в камере предварительного твердения составляет 2 ч, в течение которых происходит формирование основной структуры ячеистого бетона за счет начальных процессов гидратации цемента и стабилизации пористой структуры.

Тоннельная конструкция камеры предварительного твердения обеспечивает равномерные температурно-влажностные условия по всему объему обрабатываемых изделий, что важно для поддержания стабильности процессов структурообразования. После завершения предварительного твердения происходит постепенное снятие вакуума для предотвращения деформационных напряжений в структуре материала. Кантование бортов формы обеспечивает доступ к сформированному массиву для его извлечения и дальнейшей технологической обработки.



Рисунок 5.3 – Сформированный ячеистобетонный массив

Резка и формирование изделий.

Сформированный ячеистобетонный массив (рисунок 5.3) поступает на линию резки, где происходит формирование изделий заданных размеров и конфигурации с высокой точностью геометрических параметров. Резательная технология позволяет получать блоки различных типоразмеров в соответствии с

техническими требованиями и стандартами качества. Качество резки во многом определяется структурным состоянием массива, достигнутым на предыдущих этапах технологического процесса, и правильностью выбора времени резки относительно степени начального твердения материала.

Окончательное твердение и контроль качества. Массив после резки направляется в камеру окончательного твердения, где происходит набор прочности материала в условиях установившейся температуры и влажности. Камера набора прочности обеспечивает контролируемые условия твердения при

температуре 70 ± 2 °С и относительной влажности 95 ± 5 %. Продолжительность выдерживания определяется требуемой транспортировочной прочностью изделий, которая должна составлять не менее 50 % от проектной прочности материала.

Контроль качества готовой продукции является важным этапом технологического процесса и включает проверку физико-механических свойств материала. Испытания проводятся как разрушающими методами, так и неразрушающими способами контроля. Соответствие стандартам подтверждается сертификатами качества.

Упаковка и складирование. Заключительные этапы технологического процесса включают упаковку готовой продукции для обеспечения сохранности изделий при транспортировке и размещение на складе готовой продукции. Складские условия должны обеспечивать защиту от атмосферных воздействий и поддержание заданного влажностного режима для завершения процессов гидратации цементного вяжущего и формирования физико-механических свойств. Готовые изделия, с отпускной прочностью не менее 70 % от проектной прочности, упаковываются с использованием защитных материалов, предотвращающих повреждения при транспортировке и хранении.

Ключевым преимуществом разработанной технологической схемы производства термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения является синергетическое воздействие температурного режима и вакуумирования на формовочную массу, что позволяет управлять процессами поризации и структурообразования материала. Технология исключает необходимость автоклавной обработки, что существенно снижает энергозатраты производства и упрощает технологическую схему по сравнению с традиционными методами изготовления ячеистых бетонов. Использование золы-уноса в качестве активного минерального заполнителя способствует утилизации промышленных отходов и снижению экологической нагрузки на окружающую среду.

5.2. Техничко-экономическое обоснование эффективности производства термоваккумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения

В современных социально-экономических условиях задача повышения энергоэффективности и сокращения материальных затрат на производство строительных материалов становится приоритетной. Одним из эффективных способов достижения этой цели является внедрение ресурсосберегающих технологий, основанных на применении техногенных отходов энергетики – в частности, золы-уноса в качестве компонента неавтоклавного ячеистого бетона. Проведен анализ себестоимости производства продукции для традиционных и разработанных составов марок по средней плотности $D400$ – $D600$.

Экономическая целесообразность применения золы-уноса подтверждена сравнением затрат на основные сырьевые компоненты. В таблицах 5.1–5.3 приведены детальные расчеты по аналогии с промышленными калькуляциями.

Таблица 5.1 – Сравнение материальных затрат на производство 1 м³ ячеистого бетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности $D400$ по стоимости сырьевых материалов

Материал	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Традиционный ячеистый бетон марки по средней плотности $D400$				
Цемент	кг	390	10,5	4095
Порообразователь	кг	4	350	1400
Вода	л	160	0,04	6,4
Итого				5501,4
Разработанный ячеистый бетон марки по средней плотности $D400$				
Цемент	кг	270	10,5	2835
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	кг	120	0,38	45,6
Полипласт Аэро 815	кг	0,6	380	228
Вода	л	155	0,04	6,2
Итого				3114,8

Наиболее весомую долю в себестоимости традиционных составов занимают цемент и порообразователь, тогда как в предлагаемых рецептурах часть цемента замещается дешевым техногенным ресурсом, а используемые воздухововлекающие добавки обеспечивают стабильное формирование структуры пор.

Таблица 5.2 – Сравнение материальных затрат на производство 1 м³ ячеистого бетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D500* по стоимости сырьевых материалов

Материал	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Традиционный ячеистый бетон марки по средней плотности <i>D500</i>				
Цемент	кг	302	10,5	3171
Заполнитель	кг	183	1,8	329,4
Порообразователь	кг	0,94	350	329
Вода	л	175	0,04	7
Итого				3836,4
Разработанный ячеистый бетон марки по средней плотности <i>D500</i>				
Цемент	кг	270	10,5	2835
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	кг	190	0,38	72,2
Полипласт Аэро 815	кг	0,7	380	266
Вода	л	190	0,04	7,6
Итого				3180,8
Разработанный ячеистый бетон марки по средней плотности <i>D500</i>				
Цемент	кг	300	10,5	3150
Зола-уноса Гусиноозерской ГРЭС	кг	160	0,4	64
Полипласт Аэро 815	кг	0,6	380	228
Вода	л	155	0,04	6,2
Итого				3448,2

Таблица 5.3 – Сравнение материальных затрат на производство 1 м³ ячеистого бетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности *D600* по стоимости сырьевых материалов

Материал	Ед. изм.	Кол-во	Цена, руб. за 1 ед. изм.	Сумма, руб.
Традиционный ячеистый бетон марки по средней плотности <i>D600</i>				
Цемент	кг	386	10,5	4053
Заполнитель	кг	183	1,8	329,4
Порообразователь	кг	0,94	350	329
Вода	л	256	0,04	10,24
Итого				4721,64
Разработанный ячеистый бетон марки по средней плотности <i>D600</i>				
Цемент	кг	352	10,5	3696
Зола-уноса Рефтинской ГРЭС	кг	130	0,38	49,4
Полипласт Аэро 815	кг	0,9	380	342
Вода	л	175	0,04	7
Итого				4094,4

В частности, для марки по средней плотности $D400$ материальные затраты при классической технологии составляют 5501,4 руб. на 1 м³ продукции, а при использовании золы-уноса и воздухововлекающей добавки – 3114,8 руб., что эквивалентно снижению себестоимости более чем на 43 %. Аналогичная тенденция наблюдается для марок по средней плотности $D500$ и $D600$. Для традиционного ячеистого бетона марки по средней плотности $D500$ затраты составляют 3836,4 руб., а для разработанных составов – 3180,8 и 3448,2 руб. в зависимости от конкретного компонента – золы-уноса, при этом экономия достигает 17–21 %. Для ячеистого бетона марки по средней плотности $D600$ традиционный состав требует 4721,64 руб., в то время как внедрение золы-уноса позволяет снизить затраты до 4094,4 руб., что эквивалентно экономии 13,3 %. Во всех случаях применение техногенного заполнителя сопровождается не только снижением стоимости, но и стабилизацией основных физико-технических свойств получаемых материалов, а также позволяет значительно снизить материалоемкость производственного процесса и достичь ощутимой экономии издержек на всех рассмотренных марках по средней плотности.

5.3. Внедрение и апробация результатов исследования

Для внедрения полученных результатов разработаны и утверждены нормативные документы: стандарт организации СТО 02066339-049-2022 «Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения. Технические условия» (Приложение В) и Рекомендации по производству термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения (Приложение Г).

Обоснована технико-экономическая эффективность модернизации технологии производства, дающей возможность получать термовакuumированный ячеистый бетон марки $D400–D600$, класс $B1,5–B3,5$.

В рамках промышленной реализации результатов исследования в ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород) была изготовлена партия блоков из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения.

Полученная партия блоков использовалась при строительстве индивидуального жилого дома в г. Старый Оскол Белгородской области, где выполнена кладка наружных стен, что подтверждает практическую применимость и эффективность внедрения новой технологии. В качестве кладочного элемента использовались изделия из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения марки по средней плотности $D500$ (содержание портландцемента – 270 кг; золы-уноса Рефтинской ГРЭС – 190 кг; воздухововлекающей добавки – 0,7 кг).

Возведение наружного ограждения из ячеистобетонных блоков представлено на рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Кладка стен из ячеистобетонных блоков при строительстве индивидуального жилого дома

Имеется акт о внедрении результатов диссертационной работы ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород) по производству термовакуумированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения (Приложение Д).

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 Е).

5.4. Выводы

1. Предложена технологическая схема производства изделий из термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, особенностью которой является вакуумирование предварительно нагретой смеси.

2. Подтверждена технико-экономическая эффективность технологии производства термовакuumированных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. Установлено, что комбинированное применение температурного режима и вакуума обеспечивает снижение себестоимости продукции в диапазоне от 13 до 43 % в зависимости от марки по средней плотности материала.

3. Полученные в исследовании результаты прошли промышленную апробацию на объекте строительства индивидуального жилого дома в г. Старый Оскол Белгородской области, реализованном предприятием ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ». В ходе работ выполнена кладка наружных стен из ячеистобетонных блоков. По итогам внедрения разработок получен акт ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород) о практическом применении результатов диссертационной работы в производстве термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения. Кроме того, с целью обеспечения промышленного использования разработаны стандарт организации СТО 02066339-049-2022 «Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения. Технические условия» и рекомендации по производству указанного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о процессах формирования пористой структуры неавтоклавного ячеистого бетона при комплексном воздействии температуры и вакуума.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение термовакuumированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с однородной пористой структурой и улучшенными физико-механическими характеристиками за счет совместного применения температурного фактора и вакуумирования для управления кинетикой газовыделения и гидратации на стадии формирования структуры. Установлено, что величина вакуума 0,085–0,095 МПа создает условия для контролируемого роста газовых пузырьков, а рациональный температурный режим 39–43 °С обеспечивает необходимую скорость гидратации по закону Аррениуса.

Установлен характер влияния величины вакуума на процесс структурообразования ячеистого бетона, заключающийся в следующем. Изменение величины вакуума в диапазоне 0,055–0,095 МПа обеспечивает переход от кинетически затрудненного газовыделения к равномерному росту сферических пор. При этом величина вакуума $>0,095$ МПа приводит к коалесценции пор и критической усадке материала, тогда как величина вакуума менее 0,055 МПа не позволяет преодолеть энергетический барьер для стабильного порообразования.

Разработаны принципы управления фазовым составом ячеистобетонной смеси с использованием диаграммы агрегатных состояний, описывающей последовательность стадий структурообразования. На основе закона постоянства объемного фазового состава дисперсных систем формализован процесс перехода от начального состояния системы через стадии воздухововлечения, термовакuumирования, гидратации цемента и твердения изделия, что позволяет количественно описывать изменение объемных концентраций фаз на каждом технологическом этапе.

Развиты модельные представления о динамике расширения газовых пор в вязкоупругой среде на основе уравнения Рэлея-Плессета, адаптированного для ячеистобетонной смеси, и законов постоянства объемного фазового состава дисперсных систем.

Разработаны рациональные составы термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения с использованием промышленных отходов (золы-уноса), обеспечивающие получение изделий марок по средней плотности $D400$ – $D600$ с улучшенными прочностными (1,8–4,4 МПа) и теплоизоляционными (0,068–0,108 Вт/(м·°C)) характеристиками.

Предложена технологическая схема производства изделий из термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения, особенностью которой является вакуумирование предварительно нагретой смеси.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности предприятий по производству изделий из ячеистого бетона неавтоклавного твердения, 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 явлений на поверхности раздела фаз при термовакуумном воздействии с различным типом ячеистобетонных смесей, включая составы с комплексным применением зол-уноса различного химико-минералогического состава и других техногенных заполнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Распоряжение Правительства РФ* от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020. – № 24. – С. 3847.
2. *Постановление Правительства РФ* от 19.09.2023 г. № 1473 «Об утверждении комплексной государственной программы Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2023. – № 38. – С. 6906.
3. *Постановление Правительства РФ* от 15.04.2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие энергетики"». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2014. – № 18 (ч. III). – С. 2167.
4. *World Energy Outlook 2024*. IEA, Paris. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024#overview>
5. *СП 50.13330.2012* Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введ. 01.07.2013. – М.: Минрегион России. – 2012.
6. *Федеральный закон РФ* от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 13 июня 2023 года). – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – С. 5711.
7. *Постановление Правительства РФ* от 27.09.2021 г. № 1628 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов». – 2021. – № 40. – С. 6851.

8. *Sadriev, A. R.* World Patent Practice Analysis in the Area of Energy-Efficient and Energy-Saving Technologies / A. R. Sadriev // Mediterranean Journal of Social Sciences. – 2014. – Vol. 5(18). – P. 283-288.

9. *Wagh, Ch.* Thermal Properties of Foamed Concrete: A Review / Ch. Wagh, A. Kamiset, I. S. R. Gandhi // 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development. – 2020. – Vol. 29. – P. 113-127.

10. *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.

11. *Гущин, С. В.* Мировые тенденции развития энергосберегающих технологий / С. В. Гущин, А. С. Семиненко, Ч. Шень // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 5. – С. 31-43.

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. *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.

14. *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.

15. *Ли, Ц.* Текущая ситуация и развитие управления проектами «зеленого» строительства / Ц. Ли, Л. И. Миронова // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 5. – С. 399-402.

16. *Zeng, M. N.* Future of green BIM designing and tools / M. N. Zeng // Adv. Mater. Res. – 2012. – Vol. 374. – P. 2557-2561.

17. *Wen, Y.* A Test Bed for Verifying and Comparing BIM-Based Energy Analysis Tools / *Y. Wen, H. Kuo, S. Hsieh* // *Computing in Civil and Building Engineering*. – 2014. – P. 211.

18. *Горшков, А. С.* Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий / *А. С. Горшков* // *Инженерно-строительный журнал*. – 2010. – № 1(11). – С. 9-13.

19. *Акопян, А. Н.* Повышение эксплуатационного качества зданий и сооружений / *А. Н. Акопян, В. А. Грачев* // *Жилищное строительство*. – 2005. – № 11. – С. 12-13.

20. *Акулова, И. И.* Оценка конкурентоспособности строительных материалов и изделий: обоснование и апробация методики на примере цементов / *И. И. Акулова, Г. С. Славчева* // *Жилищное строительство*. – 2017. – № 7. – С. 9-12.

21. *Pustovgar, A. P.* A complex approach to the improvement of energy-efficiency of construction projects / *A. P. Pustovgar, L. A. Shilova, A. O. Adamtsevich, L. A. Shilov* // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10, No. 20. – P. 40988-40990.

22. *Славчева, Г. С.* Определение первоочередных направлений повышения качества и конкурентоспособности строительных материалов: методика и алгоритм / *Г. С. Славчева, И. И. Акулова* // *Строительные материалы*. – 2022. – № 3. – С. 56-60.

23. *Чернышов, Е. М.* Концепция, методология и прикладные решения проблемы строительного-технологического утилизации техногенных отходов / *Е. М. Чернышов, И. И. Акулова, М. А. Гончарова* // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2020. – № 8(740). – С. 70-91.

24. *Карпенко, Н. И.* Состояние и перспективы использования продуктов переработки техногенных образований в строительной индустрии / *Н. И. Карпенко, В. Н. Ярмаковский, Я. Ш. Школьник* // *Экология и промышленность России*. – 2012. – № 10. – С. 50-54.

25. *Ларионов, А. Н.* Экологическое жилищное строительство: проблемы и перспективы развития / А. Н. Ларионов, Ю. В. Иванова // *Academia. Архитектура и строительство.* – 2009. – № 1. – С. 57-61.

26. *ГОСТ 25485-2019* Бетоны ячеистые. Общие технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.

27. *Гиндин, М. Н.* Технологическая линия по производству мелких стеновых блоков из неавтоклавного пенобетона / М. Н. Гиндин, А. С. Сорокин, Р. Е. Ковалев // *Строительные материалы.* – 2005. – № 12. – С. 34-36.

28. *Куатбаев, А. К.* Неавтоклавные ячеистые бетоны на основе тонкомолотых сухих смесей / А. К. Куатбаев // *Промышленное и гражданское строительство.* – 2017. – № 8. – С. 55-59.

29. *Шинкевич, Е. С.* Технологические особенности производства силикатных изделий неавтоклавного твердения / Е. С. Шинкевич, Е. С. Луцкий // *Строительные материалы.* – 2008. – № 11. – С. 54-56.

30. *Iljina, L. V.* Modeling of Cement Activity Increase by Dispersed Mineral Additives / L. V. Iljina, I. N. Mukhina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XIII International Scientific Conference Architecture and Construction.* – 2020. – Vol. 953. – P. 012036.

31. *Бердов, Г. И.* Межфазное взаимодействие и механическая прочность композиционных вяжущих материалов часть 2. Цементные материалы / Г. И. Бердов, В. Н. Зырянова, Л. В. Ильина // *Техника и технология силикатов.* – 2014. – Т. 21, № 4. – С. 2-8.

32. *Сулейманова, Л. А.* Применение композиционных вяжущих в технологии ячеистого бетона / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. В. Марушко // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* – 2018. – № 2. – С. 10-16.

33. *Стешенко, А. Б.* Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон, изготовленный с использованием бурового шлама / А. Б. Стешенко, А. И. Кудряков, Н. О. Копаница // *Цемент и его применение.* – 2022. – № 6. – С. 69-71.

34. *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.

35. *Пичугин, А. П.* Экологические проблемы эффективного использования отходов и местного сырья в строительстве / А. П. Пичугин, В. И. Грохотов, М. О. Батин // Инновации в жизнь. – 2012. – № 1(1). – С. 69-77.

36. *Тускаева, З. Р.* Анализ использования отходов промышленности в производстве строительных материалов / З. Р. Тускаева, О. А. Дзущев // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – С. 338-346.

37. *Чулкова, И. Л.* Строительные композиты на основе местного техногенного сырья / И. Л. Чулкова, И. В. Пастушенко, А. С. Парфенов // Технологии бетонов. – 2014. – № 3(92). – С. 12-13.

38. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/cellular-concrete-market>

39. *Марушко, М. В.* Современное состояние производства и применения ячеистого бетона неавтоклавного твердения / М. В. Марушко, И. А. Погорелова, Л. А. Сулейманова // Университетская наука. – 2024. – № 2(18). – С. 41-46.

40. Рынок газобетона в России. [Электронный ресурс]. – URL: <https://laifhouse.ru/stati/rynok-gazobetona-v-rossii>

41. *Тугарина, А. О.* Эффективность использования техногенных отходов в производстве безавтоклавного ячеистого бетона / А. О. Тугарина // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – № 3(16). – С. 83-87.

42. *Капустин, Ф. Л.* Технологические и экологические аспекты применения золы-уноса Рефтинской ГРЭС при производстве строительных материалов / Ф. Л. Капустин // Технологии бетонов. – 2011. – № 7-8(60-61). – С. 64-65.

43. *Гладков, Д. И.* Неавтоклавный ячеистый бетон для сельского строительства / Д. И. Гладков, Л. А. Сулейманова, Л. Х. Загороднюк, Н. К. Зайцев // Промышленность строительных материалов : Информационный сборник. – Москва : НПО "Союзстромэкология", 1989. – С. 7-8.

44. *Панычев, А. Ю.* Инновационные строительные материалы: от идеи до производства / А. Ю. Панычев, А. В. Бенин, В. Я. Соловьева // Цемент и его применение. – 2022. – № 3. – С. 46-49.

45. *Космодемьянов, В. А.* Анализ рынка России на предмет использования ячеистого бетона в малоэтажном строительстве / В. А. Космодемьянов, М. Р. Фартыгин, А. Р. Скаяев // Перспективы науки. – 2019. – № 7(118). – С. 120-123.

46. Федеральная служба государственной статистики. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14458>.

47. О жилищном строительстве в российской федерации в 2021 году. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Analt_zap_Jil-ctroit_RF_2021.pdf

48. О жилищном строительстве в российской федерации в 2023 году. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/jil_stroi_2023.pdf

49. Ввод жилья ИЖС. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/zhilishnaya-politika/8/>

50. Финансовый институт развития в жилищной сфере ДОМ.РФ. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://дом.рф/>

51. *Чередниченко, Т. Ф.* Технологические и экономические аспекты развития индустрии легких бетонов конструкционного назначения / Т. Ф. Чередниченко, А. М. Тамбовцев, В. Д. Чеснокова, М. Д. Журбенко // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 9(81). – С. 1-7.

52. *Жуков, А. Д.* Неавтоклавный газобетон / А. Д. Жуков, А. В. Чугунков // Технологии бетонов. – 2012. – № 3-4. – С. 50-52.

53. *Курбатов, В. Л.* Применение ячеистых бетонов в современном строительстве / В. Л. Курбатов, И. А. Дегтев, Ю. В. Денисова // Университетская наука. – 2022. – № 1(13). – С. 64-67.

54. *Стешенко, А. Б.* Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон для индивидуального монолитного жилищного строительства / А. Б. Стешенко,

А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 320-328.

55. *Ефремов, М. А.* Исследование принципов и способов надстройки зданий / М. А. Ефремов, О. В. Петренева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2019. – Т. 2. – С. 85-92.

56. *Сулейманова, Л. А.* Строительная система из газобетона для реконструкции зданий / Л. А. Сулейманова, М. В. Марушко, А. К. Лукьяненко // Университетская наука. – 2018. – №1 (5). – С. 21-24.

57. *Славчева, Г. С.* Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства / Г. С. Славчева, Е. М. Чернышов, М. В. Новиков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 20-24.

58. *Сулейманова, Л. А.* Повышение эффективности производства и применения ячеистых бетонов / Л. А. Сулейманова, А. С. Коломацкий, И. А. Погорелова, М. В. Марушко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 11. – С. 34-42.

59. *Меркин, А. П.* Принципы формирования ячеистой структуры суперлегких строительных материалов / А. П. Меркин, А. Н. Филатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 5. – С. 20-21.

60. *Меркин, А. П.* Особенности структуры и основы получения эффективных пенобетонных материалов / А. П. Меркин, Т. Е. Кобидзе // Строительные материалы. – 1988. – № 3. – С. 16-18.

61. *Меркин, А. П.* Технология заливочного пеногипса / А. П. Меркин, Т. Е. Кобидзе, А. А. Никитин, Е. А. Зудяев // Сельское строительство. – 1988. – № 12. – С. 21.

62. *Меркин, А. П.* Устройство монолитной пенобетонной звуко теплоизоляции полов жилых зданий на строительстве Хмельницкой АЭС / А. П. Меркин, Т. Е. Кобидзе, Е. А. Зудяев. // Энергетическое строительство. – 1988. – № 11. – С. 47-49.

63. *Филиппов, Е. В.* Теплоизоляционный безавтоклавный пенобетон / Е. В. Филиппов, И. Б. Удачкин, О. И. Реутова // Строит, материалы. – 1997. – № 4. – С. 4-5.

64. *Васильев, В. Д.* Опыт использования монолитного пенобетона в строительстве / В. Д. Васильев, И. А. Лундышев // Пенобетон: сб. науч. тр.- Вест. БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. – Вып. № 4. – С.105-107.

65. *Васильев, В. Д.* Опыт многоэтажного и малоэтажного строительства с использованием установок ООО «АДС СОВБИ» / В. Д. Васильев // Ячеистые бетоны в современном строительстве: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: НП «Межрегиональная Северо-Западная строительная палата», 2004. – С.40-43.

66. *Удачкин, И. Б.* Производство ячеистого бетона способом газонасыщения под давлением / И.Б. Удачкин, В.В. Васильев, Т.Н. Назаров и др. // Строит. материалы, изделия и санитарная техника. – Киев: Будівельник, 1984. – С. 28-31.

67. *Ковальчук, Ю. Г.* Газонасыщение и гомогенизация ячеистобетонной смеси при подаче избыточного давления воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.Г. Ковальчук; Киев, строит, ин-т. – Киев, 1990. – 14 с.

68. *Коротышевский, О. В.* Новая ресурсосберегающая технология по производству высокоэффективных пенобетонов / О. В. Коротышевский // Строит, материалы. – 1999. – № 2. – С.37-38.

69. *Зыков, А. В.* Комплексное решение проблем производства пенобетона / А. В. Зыков // Строит, материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 9. – С. 42-43.

70. *Береговой, В. А.* Разработка составов и экспериментальной технологической установки по производству пористых материалов на композиционных вяжущих / В. А. Береговой, Е. В. Королев, А. М. Береговой // Строит, материалы. – 2006. – № 6. – С. 8-10.

71. *Сабирзянов, Д. Р.* Новый способ получения пенобетона и однородных систем в турбулентном смесителе кавитационного типа / Д. Р. Сабирзянов //

Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 8. – С. 40-41.

72. *Трифонов, Ю. П.* Новые технологии и установка непрерывного приготовления пенобетона под давлением / Ю. П. Трифонов // Строит. материалы. – 1999. – № 7-8. – С. 45.

73. *Трифонов, Ю. П.* Приготовление пен и пенобетонных смесей в условиях закрытой системы / Ю. П. Трифонов, В. Г. Сухов // Строит. материалы. – 2001. – № 2. – С. 68.

74. *Кобидзе, Т. Е.* Получение низкоплотного пенобетона для производства изделий и монолитного бетонирования / Т. Е. Кобидзе, В. Ф. Коровяков, С. А. Самборский // Строит, материалы. – 2004. – № 10. – С 56-58.

75. *Кобидзе, Т. Е.* Взаимосвязь структуры пены, технологии и свойств получаемого пенобетона / Т. Е. Кобидзе, В. Ф. Коровяков, А. Ю. Киселев, С. В. Лисов // Строит. материалы. – 2005. – № 1. – С. 26-29.

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

77. *Меркин, А. П.* Трехстадийная поризация ячеистобетонной смеси в производстве теплоизоляционного ячеистого бетона / А. П. Меркин // Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып. 4. – ВНИИЭСМ, 1980. – С. 15-17.

78. *Сулейманова, Л. А.* Неавтоклавные газобетоны на композиционных вяжущих / Л. А. Сулейманова, В. С. Лесовик, А. Г. Сулейманов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – 152 с.

79. *Вешневская, В. Г.* Влияние зол-уноса ТЭС на реологические и физико-механические свойства неавтоклавного газобетона / В. Г. Вешневская, И. С. Ткачук, Д. Г. Малинин // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – № 4(156). – С. 29-33.

80. Сулейманова, Л. А. Вибровакуумированный ячеистый бетон // автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Сулейманова Людмила Александровна. – Москва, 1997. – 18 с.

81. Горлов, Ю. П. Получение газобетона способом баротермального вспучивания / Ю. П. Горлов, Ю. Л. Спириц, А. И. Шунков // Строительные материалы. – 1970. - № 9. – С. 23.

82. Шахова, Л. Д. Повышение эффективности производства неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Шахова Любовь Дмитриевна. – Белгород, 2007. – 417 с.

83. Данилов, Б. П. Ограждающие конструкции из ячеистого бетона переменной плотности / Б. П. Данилов, А. А. Богранов. – М.: Стройиздат, 1973. – 102 с.

84. Авторское свидетельство 511306 СССР. Способ изготовления ячеистобетонной смеси / Ю. Г. Каплан, Г. Ф. Надарейшвили, А. А. Воробьев (СССР) // Бюллетень изобретений. – 1976 - №15. – С.19.

85. Пат. 214332 ГДР, МКИВ28В1/10 Способ изготовления пенобетона в вакууме // Открытия. Изобретения. – 1984. – №4. – С. 23.

86. Удачкин, И. Б. Новый способ получения ячеистого бетона / И. Б. Удачкин, Т. Н. Назаров, В. В. Васильев // Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып. 6. – ВНИИЭСМ, 1983. – С. 36-37

87. Крюков, В. В. Получение газобетонных изделий в герметизированных кассетных установках: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Москва, 1983. – 258 с.

88. Сулейманова, Л. А. Управление процессом формирования пористой структуры ячеистых бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 2. – С. 69-76.

89. Резанов, А. А. Технологические принципы управления макроструктурообразованием газосиликата с использованием фактора давления внешней газовой фазы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Резанов Александр Александрович. – Воронеж, 2011. – 192 с.

90. Сулейманова, Л. А. Газобетон неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Сулейманова Людмила Александровна. – Белгород, 2013. – 292 с.

91. Вишторский, Е. М. Исследование продуктов гидратации пенобетонов неавтоклавного твердения / Е. М. Вишторский, А. В. Назарова, А. П. Смирнов, И. В. Белов // Строительство и архитектура. – 2023. – №. 3. – С. 5-5.

92. Славчева, Г. С. Повышение эффективности применения неавтоклавных ячеистых бетонов в строительстве / Г. С. Славчева, С. А. Миронов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 8. – С. 78-89.

93. Otakulov, B. A. History of foam concrete production development and improvement / B. A. Otakulov, N. A. Yusupova // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 3. – P. 45-52.

94. Баранов, А. В. Неавтоклавные ячеистые бетоны с улучшенными звукопоглощающими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород: БГТУ, 2021. – 165 с.

95. Дерябин, П. П. Технология получения ячеистых бетонов способом форсированного порообразования: дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2008. – 142 с.

96. Alam, A. Mechanical properties and energy absorption capacity of aerated cellular concrete under compression / A. Alam, R. Haider, M. Ashraf // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 369. – P. 130578.

97. Али, Р. А. А. Неавтоклавный газобетон с использованием базальтовых отходов: дис. ... канд. техн. наук. – М.: НИУ МГСУ, 2021. – 148 с.

98. Шахова, Л. Д. Неавтоклавный ячеистый бетон повышенной эффективности / Л. Д. Шахова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. – 320 с.

99. Строкова, В. В. Неавтоклавный ячеистый бетон на основе сухой строительной смеси / В. В. Строкова, И. А. Ерохина, А. Б. Бухало // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2008. – № 4. – С. 23-27.

100. *Долотова, Р. Г.* Неавтоклавные ячеистые бетоны с использованием природного и техногенного низкокремнеземистого сырья: дис. канд. техн. наук. – Томск: ТПУ, 2006. – 192 с.

101. *Касумов, А. Ш. О.* Пенобетон с повышенными эксплуатационными свойствами: дис. канд. техн. наук. – М.: НИУ МГСУ, 2005. – 148 с.

102. *Баранова, А. А.* Модифицированный теплоизоляционный пенобетон повышенной прочности с применением микрокремнезема: дис. канд. техн. наук. – М.: НИУ МГСУ, 2014. – 145 с.

103. *Урханова, Л. А.* Бетон повышенной прочности на композиционном вяжущем / Л. А. Урханова, С. А. Лхасаранов // Вестник ВСГУТУ. – 2012. – № 4. – С. 23-29.

104. *Зеленков, Д. С.* Поризованные бетоны на композиционных вяжущих: дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. – 156 с.

105. *Павленко, Н. В.* Пенобетон на основе композиционных вяжущих с активными минеральными добавками: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород: БГТУ, 2009. – 154 с.

106. *Раков, М. А.* Неавтоклавный газобетон на композиционных вяжущих / М. А. Раков. – Казань: КГАСУ, 2020. – 168 с.

107. *Шевченко, В. А.* Бесцементное вяжущее из зольно-кремнеземистых композиций / В. А. Шевченко, Н. А. Артемьева // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 1. – С. 134-138.

108. *Красиникова, Н. М.* Новый способ приготовления пенобетона / Н. М. Красиникова, И. Б. Удачкин, Т. Т. Троцко // Строительные материалы. – 2009. – № 3. – С. 56-58.

109. *Ибе, Е. Е.* Многокомпонентные вяжущие на основе зол-уноса для бетонов ультравысоких технологий / Е. Е. Ибе, Д. Н. Коротких // Технологии бетонов. – 2021. – № 9-10. – С. 45-49.

110. *Пузатова, А. В.* Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения / А. В. Пузатова, М. А. Дмитриева, А. А. Захаров // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 5. – С. 132-147.

111. *Копаница, Н. О.* Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента / Н. О. Копаница, О. В. Демьяненко, А. А. Куликова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 10. – С. 49-60

112. *Владимиров, Д. В.* Ячеистый бетон на основе золы Экибастузской ГРЭС-2 / Д. В. Владимиров, А. С. Петров // Вестник КазНТУ. – 2022. – № 4. – С. 234-241.

113. *Шах, Т. М.* Бетон с повышенным содержанием золы и добавкой ацетоноформальдегидаминной смолы: дисс. канд. техн. наук. – Ташкент: ТаШИСИ, 2005. – 150 с.

114. *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.

115. *Шестеркин, М. Н.* Ячеистый бетон неавтоклавного твердения на основе стеклобоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГСУ, 2002. – 22 с.

116. *Smith, J.* Eco-friendly autoclave-free foamed concrete production using bio-based foaming agents / J. Smith, A. Doe // Cement Research Journal. – 2021. – Vol. 45. – P. 234-248.

117. *Rossi, L.* Furfural alcohol applications in gas-foamed concrete composites for enhanced durability / L. Rossi, M. Bianchi, D. Ferretti // Construction Materials Science. – 2020. – Vol. 38. – P. 189-203.

118. *Mohamed, A. M.* Ultra-light foamed concrete mechanical properties and structural behavior / A. M. Mohamed, H. A. Gamal, A. S. El-Dieb // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 75. – P. 106891.

119. *Mohamed, A. M.* Ultra-light foamed concrete: mechanical properties and oxygen release characteristics / A. M. Mohamed, S. M. A. El-Gamal, F. S. Hashem // Materials Today Communications. – 2024. – Vol. 38. – P. 107568.

120. *Ali, A. W.* Production of lightweight foam concrete with sustainable materials including limestone dust / A. W. Ali, M. I. Qureshi, M. Shujaatullah // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. – 2021. – Vol. 11, № 5. – P. 7621-7625.

121. *Zhang, J.* Influence of foam content on mechanical properties and thermal performance of ceramsite foam concrete / J. Zhang, F. Wang, H. Liu // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 389.

122. *Щербань, Е. М.* Наномодифицированный бетон с наноалмазами / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 412. – P. 134789-134801.

123. *Стельмах, С. А.* Высокотехнологичный самоуплотняющийся бетон на основе наномодификаторов / С. А. Стельмах, Е. М. Щербань // *Вестник ДГТУ*. – 2022. – № 3. – С. 67-78.

124. *Косых, А. В.* Влияние вакуумного воздействия на структурообразование газобетона / А. В. Косых, А. О. Тугарина // *Строительные материалы*. – 2006. – № 8. – С. 42-44.

125. *Костромин, Н. Н.* Активация минеральных компонентов методом гидромеханоактивации / Н. Н. Костромин // *Строительные материалы*. – 2006. – № 12. – С. 28-31.

126. *Щербань, Е. М.* Модификация пенобетонов воздействием электрическим полем / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2014. – 156 с.

127. *Жабин, Д. В.* Ячеистый бетон, модифицированный электрогидротеплосиловым полем: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ-МГСУ, 2014. – 167 с.

128. *Lv, X. S.* High-performance lightweight foam concrete enabled by superhydrophobic coating / X. S. Lv, B. Chen, W. Ma // *Cement and Concrete Research*. – 2024. – Vol. 176. – P. 107389.

129. *Lv, X. S.* High-performance lightweight foam concrete with enhanced durability using polymethylhydrosiloxane / X. S. Lv, H. Wang, L. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 411. – P. 134563.

130. *Alam, A.* Aerated concrete: mechanical properties and energy absorption under dynamic loading / A. Alam, R. Singh, P. Kumar // *Cement and Concrete Composites.* – 2023. – Vol. 134. – P. 104762.

131. *Lupini, R.* Ultrasonic activation effects on foamed concrete microstructure and properties / R. Lupini, G. Mancinelli, R. Sposito // *Journal of Materials Science.* – 2022. – Vol. 57. – P. 1456-1472.

132. *Alassane, C.* Performance of foam concrete containing relatively low-temperature calcined metakaolin / C. Alassane, B. Moussa, A. Ibrahim // *Journal of Sustainable Construction Materials.* – 2025. – Vol. 8, № 2. – P. 145-159.

133. *Mayhoub, O.* A review on sustainable lightweight foamed concrete: materials, properties and applications / O. Mayhoub, A. Ibrahim, M. Hassan // *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies.* – 2025. – Vol. 10, № 1. – P. 15-34.

134. *Asante-Amankwa, M.* Investigating lightweight foamed concrete prepared using local powder detergents as foaming agents / M. Asante-Amankwa, S. Dzifa Doe, A. Ofori-Boadu // *Ceramics International.* – 2025. – Vol. 51. – P. 12456-12467.

135. *Zuhair, B.* Innovative approach to foam concrete production using recycled foam concrete waste / B. Zuhair, A. M. Hassan, K. Rashid // *Journal of Engineering.* – 2025. – Vol. 31, № 4. – P. 159-174.

136. *Latoszek, P.* Foam concrete utilization research in sustainable construction applications: Master's thesis / P. Latoszek. – Toronto: University of Toronto, 2011. – 98 p.

137. *Зимакова, Г. А.* Состав, структура и свойства многокомпонентных ячеистых бетонов / Г. А. Зимакова, В. В. Петров // *Строительные материалы и изделия.* – 2023. – № 2. – С. 45-56.

138. *ГОСТ 31108-2020* Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

139. *ГОСТ 25818-2017* Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с.

140. *ГОСТ 24211-2008* Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2010. – 17 с.

141. *ТУ 5745-090-58042865-2014* Воздухововлекающая добавка «Полипласт Аэро 815». Технические условия. – 2023.

142. *ТУ 5745-030-58042865-2008* Добавка для бетонов и строительных растворов «Аэропласт». Технические условия. – 2008.

143. *ТУ 5745-001-04230553-2016* Комплексная добавка для строительных растворов «Ритент Аэромикс». Технические условия. – 2016.

144. *ГОСТ 23732–2011* Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (с Поправкой). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.

145. *ГОСТ 310.3-76* Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

146. *ГОСТ 10181-2014* Смеси бетонные. Методы испытаний. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28 с.

147. *ГОСТ 22685* Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2006. – 11 с.

148. *ГОСТ Р 58515-2019* Кельмы, лопатки и отрезовки. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 23 с.

149. *ГОСТ 25271-93 (ИСО 2555-89)* Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду. Официальное издание. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 14 с.

150. *ГОСТ 8.428-81 (СТ СЭВ 630-84)* Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Ареометры. Значения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей. Официальное издание. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 11 с.

151. *ГОСТ 12730.4-2020* Бетоны. Методы определения параметров пористости. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 13 с.

152. *Погорелова, И. А.* Патент на изобретение №2811671. Способ определения пористости ячеистых бетонов / И. А. Погорелова, К. А. Сулейманов, В. С. Лесовик, И. С. Рябчевский. Оpubл.: 15.01.24.

153. *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.

154. *ГОСТ 12852.0-2020* Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний (с Поправками). Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 8 с.

155. *ГОСТ 27005-2014* Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

156. *ГОСТ 10180-2012* Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

157. *ГОСТ 12730.3-2020* Бетоны. Метод определения водопоглощения (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 6 с.

158. *ГОСТ 25898-2020* Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 9 с.

159. *ГОСТ 7076-99* Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Официальное издание. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 22 с.

160. *Сулейманова, Л. А.* Вибровакуумированные гипсосоодержащие композиты / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. В. Марушко, Н. В. Огнев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 12. – С. 62-66.

161. *Suleymanova, L. A.* Processing methods used to create high-quality porous structure of aerated concrete / L. A. Suleymanova, M. V. Marushko, A. S. Kolomatsky // Materials Science Forum. 2020. – Vol. 992. – P. 212-217. –

162. *Марушко, М. В.* Патент на изобретение №2750535. Способ изготовления ячеистобетонных изделий // М. В. Марушко, Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, И. А. Погорелова.: Оpubл. 29.06.2021.

163. *Адамсон, А.* Физическая химия поверхностей: пер. с англ / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.

164. *Popov, A. M.* Harnessing the Capabilities of Spray Granulation in the Food Industry for the Production of Functional Foods / A. M. Popov, I. N. Tikhonova, N. V. Tikhonov, V. V. Tikhonov // *Procedia Chemistry*. – 2014. – Vol. 10. P. 419-423.

165. *Ильина, Л. В.* Изменение фазового состава минеральной добавки при ее измельчении / Л. В. Ильина, Д. А. Цекарь, А. А. Рудакова // *Качество. Технологии. Инновации: Материалы VIII Международной научно-практической конференции*. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2025. – С. 75-80.

166. *Попов, А. М.* Управление составом и свойствами влажных дисперсных систем / А. М. Попов, А. М. Сорочкин, А. А. Сарафанов, И. А. Михайлова, Е. И. Шилова // *Техника и технология пищевых производств*. – 2011. – № 3. – С. 92–96.

167. *Витюгин, В. М.* Исследование процесса гранулирования скатыванием с учетом свойств комкуемых дисперсий. дисс. ... д-ра техн. наук. – Томск, 1975. – 312 с.

168. *Марушко, М. В.* Вибровакуумированные пористые композиты / М. В. Марушко, Л. А. Сулейманова, В. А. Белогуров // *Наука и инновации в строительстве: сб. докл. Международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова)*. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 405-408.

169. *Лыков, А. В.* Теория сушки / А. В. Лыков. – М: Энергия, 1968. – 472 с.

170. *Sueymanova, L. A.* Thermally insulated cellular geopolymer / L. A. Suleymanova, M. V. Marushko, I. S. Ryabchevskiy, I. A. Pogorelova // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 2758. – P. 58-62.

171. Сулейманова, Л. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022680208. Программа моделирования изменения фазового состава термовакуумированных ячеистых геополимербетонов неавтоклавного твердения / Л. А. Сулейманова, И. А. Погорелова, М. В. Марушко, И. С. Рябчевский, М. А. Богачева.: Оpubл. 28.10.2022.

172. Сулейманова, Л. А. Закономерности изменения объема газозвухосодержащих композиций при воздействии на них вакуума и вибрации / Л. А. Сулейманова, К. А. Кара // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. – 2010. – С. 253-255.

173. Марушко, М. В. Исследование влияния рецептурно-технологических факторов на физико-механические характеристики термовакуумированного ячеистого бетона неавтоклавного твердения / М. В. Марушко, И. А. Погорелова, Л. А. Сулейманова // Вестник евразийской науки. – 2024 – Т. 16 – № 6 – URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN624.pdf>.

174. Suleymanova, L. A. Theoretical basis of formation highly organized porous structure of aerated concrete / L. A. Suleymanova, I. A. Pogorelova, M. V. Marushko // Materials Science Forum. – 2018. Vol. 945. – P. 309-317.

175. Хархардин, А. Н. Структурно-топологические основы разработки эффективных композиционных материалов и изделий: дис. ... д-ра техн. наук / Хархардин Анатолий Николаевич. – Белгород, 1999. 4– 75 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Патент на изобретение № 2750535

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2750535

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Марушко Михаил Викторович (RU), Сулейманова Людмила Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Погорелова Инна Александровна (RU)*

Заявка № 2020138324

Приоритет изобретения **23 ноября 2020 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **29 июня 2021 г.**

Срок действия исключительного права на изобретение истекает **23 ноября 2040 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022680208**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680208

**«Программа моделирования изменения фазового
состава термовакуумированных ячеистых
геополимербетонов неавтоклавного твердения»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Белгородский
государственный технологический университет им. В.Г.
Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Погорелова
Инна Александровна (RU), Марушко Михаил Викторович (RU),
Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Богачева Марина
Александровна (RU)*

Заявка № **2022669569**

Дата поступления **19 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **28 октября 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

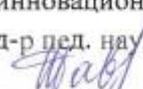
Ю.С. Зубов

**Титульный лист стандарта организации СТО 02066339-049-2022
«Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавного твердения.
Технические условия»**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р пед. наук, профессор

Т.М. Давыденко
«06» 06 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор
С.Н. Глаголев

06 2022 г.



**ТЕРМОВАКУМИРОВАННЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН
НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ**

**Технические условия
СТО 02066339-049-2022**

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
канд. техн. наук, доцент
 И.А. Погорелова
«06» 06 2022 г.

Исполнитель:

аспирант
 М.В. Марушко
«06» 06 2022 г.

Белгород 2022 г.

**Титульный лист рекомендаций по производству термовакuumированного
ячеистого бетона неавтоклавного твердения**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. Г. ШУХОВА**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р. физ. наук, профессор

Т.М. Давыденко

«06» 06 2022 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по производству термовакuumированного ячеистого бетона
неавтоклавного твердения

РАЗРАБОТАНО

Научный руководитель:

канд. техн. наук, доцент

И.А. Погорелова

«06» 06 2022 г.

Исполнитель:

аспирант

М.В. Марушко

«06» 06 2022 г.

Белгород 2022 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-он,
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»
А.В. Свиначев
11.07.2022

АКТ

о внедрении результатов научной работы «Термовакuumированный ячеистый бетон»

Комиссия в составе:

представители ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

начальник строительной лаборатории Агаркова Ю.С.,
начальник опытного цеха Апанасенко А.Н.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. каф. СиГХ, д-р техн. наук, проф. Сулейманова Л.А.,
старший преподаватель, аспирант Марушко М.В.,
ассистент, аспирант Рябчевский И.С.

составили настоящий акт о том, что результаты научной работы использованы при производстве изделий стеновых неармированных из ячеистого бетона в виде рецептурно-технологических параметров, технологических приемов и режимов производства ячеистобетонных изделий (патент №2750535 «Способ изготовления ячеистобетонных изделий»), позволившим упростить технологию, сократить технологический цикл производства. Обеспечение одновременного выполнения процесса формирования пористой структуры композита и термовакuumирования по рекомендованному режиму создает благоприятные условия для наиболее полного использования потенциальных возможностей порообразователя и формирования микроструктуры композита без внутренних напряжений, при этом снижается средняя плотность на 20 % и выше с одновременным повышением коэффициента конструктивного качества. Использованные результаты по рационализации составов ячеистобетонных смесей D400...D600 позволили повысить показатели качества выпускаемой продукции.

Выпущенная опытная партия блоков стеновых мелких из неавтоклавно-конструкционно-теплоизоляционного газобетона была использована в качестве наружной ограждающей конструкции при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Набережная в микрорайоне Разумное-71 пгт Разумное Белгородского района, Белгородской области.

Начальник строительной лаборатории

Начальник опытного цеха

Зав. кафедрой СиГХ

Старший преподаватель, аспирант

Ассистент, аспирант

Ю.С. Агаркова

А.Н. Апанасенко

Л.А. Сулейманова

М.В. Марушко

И.С. Рябчевский

Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

ИТТУ им. В.Г. Шухова

д-р техн. наук, профессор

Е.И. Евтушенко

«22» 02 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы М.В. Марушко «Термовакuumированный ячеистый бетон неавтоклавногo 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 и городской инфраструктуры», «Современные технологии в строительстве», «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии при реконструкции и эксплуатации объектов городской застройки».

Зав. кафедрой строительства
и городского хозяйства,
д-р техн. наук, профессор

Л.А. Сулейманова

Директор Инженерно-строительного
института, д-р техн. наук, профессор

В.А. Уваров