

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

На правах рукописи



СУЛЕЙМАНОВ КАРИМ АБДУЛЛАЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОБЕТОНА
В ДОАВТОКЛАВНЫЙ ПЕРИОД**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

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

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Лесовик Валерий Станиславович**

Белгород 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1. Современное состояние производства и применения газобетона в строительстве.....	11
1.2. Тепловыделение при твердении газобетона.....	19
1.2.1. Тепловыделение при взаимодействии цемента с водой	21
1.2.2. Влияние различных факторов на тепловыделение цемента.....	24
1.3. Порообразование в газобетонных смесях.....	29
1.4. Пути повышения эффективности производства автоклавного газобетона	38
1.5. Выводы.....	43
2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	44
2.1. Методы исследований	44
2.1.1. Методика изучения состава и структуры сырьевых компонентов	44
2.1.2. Изучение свойств газобетонных смесей и газобетона	46
2.1.3. Методика определения физико-механических и теплотехнических характеристик.....	48
2.2. Характеристика применяемых материалов	53
2.3. Выводы.....	60
3. ТВЕРДЕНИЕ ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ	61
3.1. Процессы гидратообразования в газобетонной смеси	61
3.1.1. Система «Известь – Алюминий – Вода»	62
3.1.2. Система «Известь - Алюминий - Цемент – Вода».....	63
3.1.3. Система «Известь - Алюминий - Цемент - Гипс – Вода».....	65
3.2. Теплофизические характеристики газобетонных смесей	66
3.3. Термический потенциал газобетонных смесей.....	70

3.4. Порообразование в газобетонной смеси	81
3.5. Характеристика крупных пор в структуре газобетона	90
3.5.1. Поры воздухововлечения	91
3.5.2. Сегментные пузыри	104
3.6. Выводы	117
4. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОБЕТОННОГО МАССИВА	120
4.1. Термические явления в газобетонном массиве	120
4.1.1. Экзотермия процессов	120
4.1.2. Оптимизация температурного режима твердения массива	123
4.2. Предотвращение крупных дефектов пористой структуры	131
4.3. Физико-механические свойства газобетона при оптимальных параметрах технологии	138
4.3.1. Средняя плотность и предел прочности при сжатии	138
4.3.2. Экспериментальное исследование эмпирических зависимостей изменения прочности и модуля упругости ячеистого бетона	144
4.3.3. Водопоглощение от капиллярного воздействия	151
4.3.4. Морозостойкость	156
4.3.5. Теплопроводность	162
4.3.6. Паропроницаемость	162
4.3.7. Усадка	162
4.4. Выводы	164
5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА И ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ	166
5.1. Совершенствование технологической схемы производства изделий из газобетона автоклавного твердения	166
5.2. Повышение теплотехнической однородности ограждающих конструкций из газобетонных блоков	179
5.3. Экономическая эффективность автоклавного газобетона высокорганизованной структуры	187

5.4. Внедрение и апробация результатов исследования.....	188
5.5. Выводы.....	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	192
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	194
П Р И Л О Ж Е Н И Я.....	219
Приложение А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662983	220
Приложение Б. Патент на изобретение № 2811671	221
Приложение В. Патент на изобретение № 2822855.....	222
Приложение Г. Патент на полезную модель № 200967	223
Приложение Д. Патент на полезную модель № 200968.....	224
Приложение Е. Титульный лист стандарта организации.....	225
«Газобетон с высокоорганизованной структурой. Технические условия» ...	225
Приложение Ж. Титульный лист рекомендаций по производству газобетона с высокоорганизованной структурой	226
Приложение И. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «Масикс»	227
Приложение К. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «Сибирский элемент Рента-К».....	228
Приложение Л. Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»	229
Приложение М. Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс	230

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В рамках реализуемого государством курса на всестороннее ресурсосбережение, стеновые материалы на основе автоклавного ячеистого бетона обретают особое значение. Актуальным является вопрос повышения прочности конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона при сохранении его плотности. Это возможно путем создания высокопористых структур, что является эффективным инструментом снижения энерго- и материалоемкости получения ячеистых бетонов. Помимо этого, высокие экологические и теплофизические свойства данного вида изделий обеспечивают благоприятный микроклимат помещений и снижение теплотерь на всем жизненном цикле эксплуатации здания.

В этой связи повышение качества ячеистых бетонов за счет технологических приемов, нацеленных на создание высокоорганизованной структуры, характеризующейся отсутствием пор воздухововлечения и сегментных пузырей, как дефектов структуры, является весьма актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в рамках Программы «Приоритет-2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова Пр-10/22 с использованием оборудования центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время в области строительного материаловедения в Российской Федерации деятельность ряда научных школ связана с разработкой ячеистых бетонов, изучением теоретических представлений о процессах структурообразования пористых композитов с требуемыми физико-механическими характеристиками и показателями долговечности. Исследователями определено, что оптимальная макроструктура характеризуется высокой степенью поризации материала, равномерным распределением пор в бетоне, рациональным распределением ячеек по размерам и малой дефектностью межпоровых перегородок. При этом остаются открытыми вопросы создания ячеистых бетонов бездефектной высокоорганизованной

структуры с учетом термических процессов ее формирования при отсутствии порозового воздуха и сегментных пузырей в газобетонной смеси.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение газобетона высокоорганизованной структуры с повышенными физико-механическими характеристиками за счет оптимизации порообразования и термических процессов в газобетонной смеси в доавтоклавный период.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– изучение механизма формирования порозового воздуха и сегментных пузырей в ячеистобетонной смеси и оценка их влияния на формирование структуры газобетона в доавтоклавный период;

– выявление вклада экзотермических процессов в формировании пористой структуры при твердении в доавтоклавный период;

– разработка технологических приемов получения газобетонного массива высокоорганизованной структуры при формировании пористости и интенсивном тепловыделении;

– оценка влияния технологического решения на свойства газобетона;

– подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований; апробация результатов исследований в производственных условиях и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна работы. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение газобетона высокоорганизованной структуры за счет: регулирования расхода извести, физико-механической обработки смеси виброгребнем после ее заливки, создания термосных условий в камере предварительного твердения. Изменение расхода извести позволяет регулировать термический потенциал газобетонной смеси из условия $1 \text{ кг/м}^3 \text{ СаО}$ на $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Воздействие на газобетонную смесь виброгребня путем перемещения формы под ним со скоростью 12 м/мин обеспечивает дробление порозового воздуха до размера менее 2 мм , сопоставимого с порами

газовыделения. Снижение градиента температур при создании термосных условий твердения до 12-15 °С приводит к достижению температуры поверхности массива порядка 54 °С, соответствующей значению на дне формы, что предотвращает образование сегментных пузырей. Совершенствование технологии газобетона обеспечивает повышение прочности на 50-60 % и снижение теплопроводности на 10-15 %.

Установлены условия формирования дефектов структуры – пор воздухововлечения и сегментных пузырей. Показано, что поры воздухововлечения, образовавшиеся во время заливки ячеистобетонной смеси, имеют форму перевернутой капли, характеризуемой тремя радиусами кривизны и высотой. Образование сегментных пузырей происходит в области максимума скорости гидратации извести, а условием их горизонтального перемещения является градиент тангенциальных сил в направлении повышенной асимметрии данного вида дефекта структуры, что приводит к выходу газа и оседанию смеси в форме или к нарушению структуры массива из-за разрывов сплошности.

Сформулированы теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов (как интегрального тепловыделения, так и градиента температур) на снижение доли сегментных пузырей как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период. Процессы, протекающие в твердеющей газобетонной смеси, ранжированы по значимости вклада в создание температурного уровня: гидратация цемента → газовыделение за счет дисперсного алюминия → гидратация оксида кальция.

Теоретическая и практическая значимость работы. Развита теоретическая представления о природе и видах дефектов газобетона, а также о формировании высокоорганизованной структуры газобетона, что позволило разработать научно обоснованное технологическое решение совершенствования процесса производства газобетона в доавтоклавный период – от стадии заливки смеси в формы до резки массива.

Предложено совершенствование технологической линии по производству автоклавного газобетона, заключающееся в регулировании содержания извести, введении физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки и применении термосного метода в камере предварительного твердения.

Обоснованное технологическое решение обеспечивает получение газобетона с высокоорганизованной макроструктурой по эксплуатационным свойствам превосходящего характеристики автоклавных газобетонов, произведенных по традиционной технологии, с обеспечением класса прочности *B5* при марке по плотности *D500*.

Разработаны мероприятия по повышению теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являлись результаты фундаментальных и прикладных исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными в области получения автоклавного газобетона. Для изучения вяжущих и смесей на их основе применен комплекс методов исследования с использованием современного высокотехнологичного оборудования, получены обоснованные и достоверные результаты. Исследования основаны на методах, включающих рентгеновскую дифрактометрию и растрово-электронную микроскопию. Стандартизированные характеристики готовых образцов ячеистых бетонов определялись согласно нормативным документам.

Положения, выносимые на защиту:

– теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение газобетона с высокоорганизованной структурой за счет регулирования содержания извести, физико-механической обработки смеси и создания термосных условий;

– условия формирования дефектов структуры – пор воздухововлечения и сегментных пузырей;

– теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов на снижение доли

сегментных пузырей и пор воздухововлечения, как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период;

- свойства автоклавного газобетона с высокоорганизованной структурой;
- принципы совершенствования технологии по производству газобетона в доавтоклавный период. Результаты апробации.

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

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы исследований докладывались и обсуждались на: IV, VII и VIII Международных студенческих строительных форумах (Белгород, 2019, 2022, 2023); II Международном онлайн-конгрессе «Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека» (Белгород, 2019); V и VII Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2021, 2023), I международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Информационные технологии» (Новороссийск, 2023), Национальной конференции «Актуальные вопросы техники, науки, технологии» (Брянск, 2024), IX Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024), VII Международной научно-практической конференции «Современный автоклавный газобетон» (Москва, 2024).

Внедрение результатов исследований. Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась на предприятиях ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону), ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (д. Обухово, Калужская обл.), ООО «Стройтехнология» (г. Белгород).

Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-068-2023 «Газобетон с высокоорганизованной структурой» и Рекомендации по производству газобетона с высокоорганизованной структурой.

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

Публикации. Основные положения работы изложены в 21 публикации, в том числе: 4 статьи в российском журнале, входящем в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 работа в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Получено 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель и Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Личный вклад состоит в непосредственном участии в получении, анализе, систематизации исходных теоретических данных на всех этапах проведения исследований, личном выполнении всех экспериментов, их подготовке и анализе полученных результатов, самостоятельном формулировании положений, вынесенных на защиту, в которых отражаются основные результаты проведенного исследования, а также выводов, составляющих научную новизну и подтверждающих теоретическую и практическую значимость работы. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Результаты изложены на 230 страницах машинописного текста, включающих 31 таблицу, 105 рисунков, список литературы из 226 источников, 11 приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Современное состояние производства и применения газобетона в строительстве

Ежегодный ввод более 120 млн. м² нового жилья в перспективе до 2030 г. – одна из приоритетных задач, утвержденных в рамках стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства в Российской Федерации на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г. [1].

Особый приоритет в этом вопросе возложен на индивидуальное жилищное строительство (ИЖС), однако достижение заявленных показателей вводимого жилья зависит от масштабного освоения новых эффективных технологий производства востребованных строительных материалов, отличающихся простотой, мобильностью и инвестиционной привлекательностью, одним из которых является производство газобетона, отвечающего требованиям современного строительства.

Рост спроса на высокоэффективные стеновые материалы напрямую связан с усилением требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций. Это обусловлено как повышением нормативов энергоэффективности зданий, так и увеличением инвестиционных возможностей, как со стороны компаний и предприятий, так и со стороны частных застройщиков. В этой связи активно развивается производство легких бетонов, особенно ячеистых, которые широко применяются в строительстве ограждающих конструкций зданий с улучшенными теплоизоляционными характеристиками. Ячеистые бетоны находят применение при возведении однослойных стен, монолитных перекрытий и кровель малоэтажных зданий, обеспечивая качественную теплоизоляцию чердачных перекрытий и полов первых этажей. Кроме того, такие материалы успешно используются для звукоизоляции межэтажных перекрытий, стен и перегородок, а также для монолитного бетонирования [2-12].

С повышением требований к энергоэффективности зданий увеличиваются и требования к качественным характеристикам используемых материалов. В частности, особое внимание уделяется прочностным показателям конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных бетонов. Эти материалы должны не только

обеспечивать высокий уровень теплоизоляции, но и обладать достаточной прочностью для использования в строительных конструкциях [13-15]. В связи с этим возросла необходимость организации производства сверхлегких теплоизоляционных бетонов с плотностью 120-300 кг/м³, которые могут эффективно заменить традиционные теплоизоляционные материалы, такие как минеральная вата и пенополистирол. Эти материалы имеют определенные недостатки, что стимулирует переход на более инновационные решения в сфере теплоизоляции [16-18].

Ячеистые бетоны нашли широкое применение в различных сферах современного строительства благодаря уникальным характеристикам их пористой структуры, что, в свою очередь, обуславливает разнообразие их функциональных назначений.

Ячеистый бетон – это искусственный высокотехнологичный пористый строительный материал, состоящий из затвердевшей смеси минерального вяжущего, кремнеземистого компонента и искусственных равномерно распределенных пор в виде ячеек, образованных газо- и пенообразователем, являющийся одной из разновидностей легкого бетона.

Достоинством ячеистого бетона является комплекс положительных свойств, которые делают его технически и экономически предпочтительным строительным материалом в жилищном строительстве. Конструктивные и строительно-технические свойства позволяют возводить стеновые конструкции, а также перекрытия и покрытия из ячеистого бетона.

В стеновых конструкциях из ячеистого бетона нет необходимости использовать дополнительные строительные материалы, которые необходимы для обеспечения тепло-, звуко- и противопожарной защиты, что является эффективным как с экономической точки зрения, так и для надежного, исключая ошибки производства строительных работ.

В соответствии с [19, 20], ячеистый бетон классифицируется по основным признакам: по применению, по назначению, по условиям твердения, по способу порообразования, по виду вяжущего и по виду кремнеземистого компонента, представленным на рисунке 1.1.

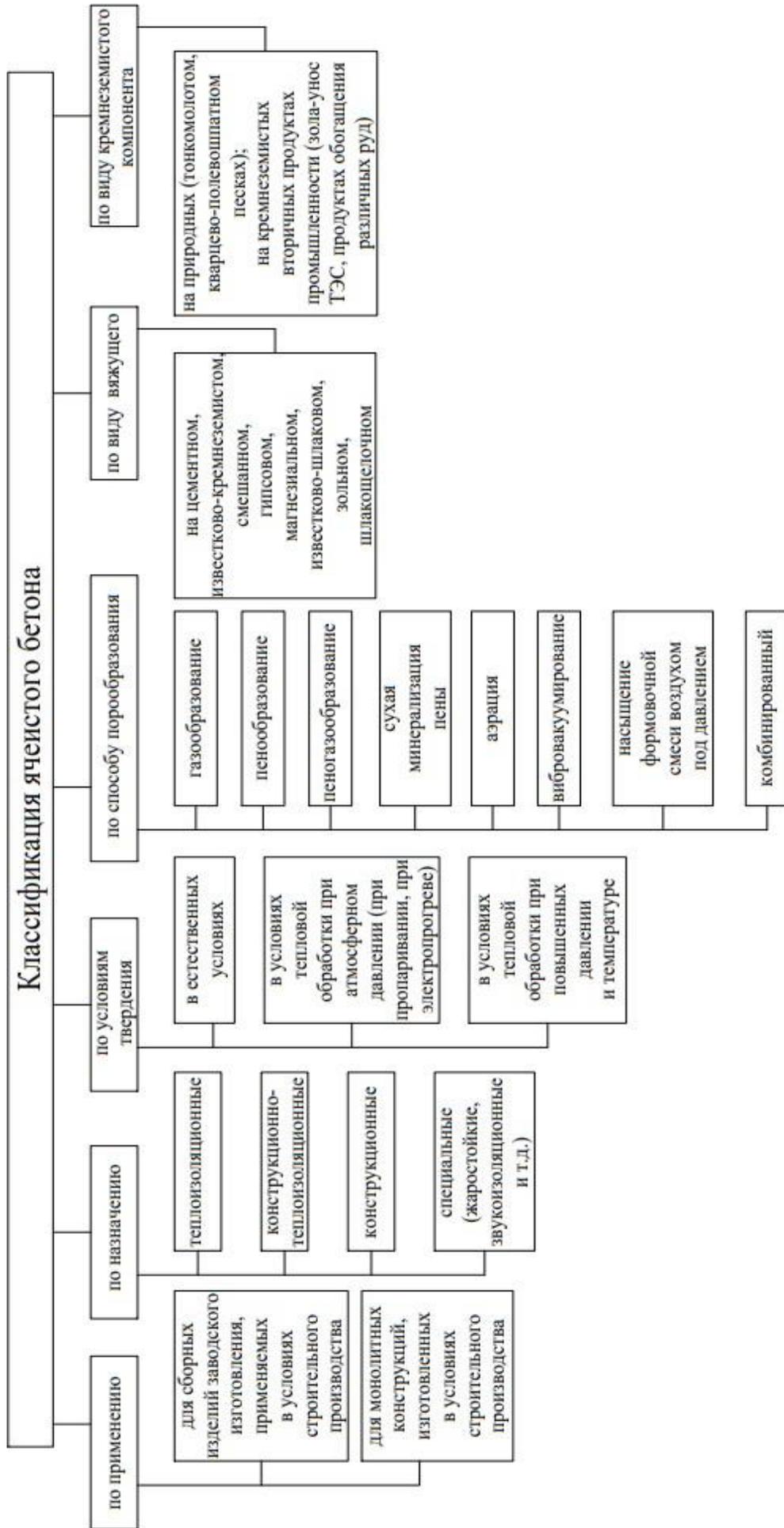


Рисунок 1.1 – Классификация ячеистого бетона

Для возведения стен используют следующие неармированные изделия из газобетона: блоки, крупные блоки, плиты, блочные панели, стеновые панели. Строительные конструкции, работающие на изгиб, должны воспринимать растягивающие усилия, эту функцию в ячеистобетонных изделиях выполняет арматура, как и в обычном железобетоне.

Для конструкций покрытий и перекрытий используются плиты перекрытия и плиты покрытия. Применяют армированные стеновые панели: панели соединения «паз-паз», панели соединения «паз-гребень» и ровные поверхности и стеновые панели для хозяйственного строительства. Армированные стеновые панели монтируют горизонтально и вертикально.

Также выпускаются доборные армированные и неармированные изделия из ячеистого бетона: выравнивающие блоки, поясные блоки, брусковые и составные перемычки, U-блоки, U-опалубка, лестничные ступени, блоки-облицовки, дугообразные блоки, перемычки брусковые и составные.

В строительной практике рекомендуется использовать различные виды и элементы автоклавных газо- и пенобетонов для возведения жилых и общественных зданий – мелкие блоки для наружных и внутренних стен, соответствующие стандарту ГОСТ 21520-89; крупные блоки для тех же целей, согласно ГОСТ Р 59957-2021; неармированные стеновые изделия по ГОСТ 31360-2007; панели, предназначенные для внутренних несущих стен, перегородок и перекрытий в жилых и общественных зданиях (ГОСТ 19570-2018, ГОСТ 12504-2015); панели для наружных стен зданий, соответствующие ГОСТ 11118-2009; а также теплоизоляционные блоки и плиты, регламентируемые ГОСТ 5742-2021. Кроме того, используются панели покрытий для жилых и общественных зданий. Что касается неавтоклавных газо- и пенобетонов, то из них изготавливаются мелкие блоки для наружных и внутренних стен (по ГОСТ 21520-89) и теплоизоляционные изделия (по ГОСТ 5742-2021). Эти материалы также применяются для монолитной теплоизоляции подвальных и чердачных перекрытий, а также для создания монолитных внутренних и наружных стен жилых и общественных зданий, для утепления и усиления стен реконструируемых объектов, а также в качестве декоративного огнестойкого материала. В номенклатурный ряд продукции из автоклавного газобетона входят и декоративные элементы – малые

арт-объекты, декоративная плитка, а также утеплители – плиты низкой плотности и крошка.

С 1 января 2025 г. вводятся в действие стандарты ГОСТ 31359-2024 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия» и ГОСТ 3136-2024 «Изделия для каменной кладки. Блоки из ячеистого автоклавного бетона».

Материалы и изделия из ячеистого бетона имеют различные физико-механические характеристики, классификация которых представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физико-механические характеристики ячеистых бетонов

Марка бетона	Класс по прочности на сжатие															Марка по морозостойкости, Вт/м ³ ·°С	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м·°С	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	
	B0,35	B0,5	B0,75	B1	B1,5	B2	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5	B15	B17,5	B20				
Ячеистые бетоны автоклавного твердения																			
D200	■	■	■	■														0,048	0,3
D250	■	■	■	■														0,06	0,28
D300	■	■	■	■														0,072	0,26
D350	■	■	■	■														0,084	0,25
D400	■	■	■	■														0,096	0,23
D450					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		0,108	0,21
D500					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F35	0,12	0,2
D600					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F75	0,14	0,16
D700									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F100	0,17	0,15
D800									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F100	0,19	0,14
D900									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F75	0,22	0,12
D1000									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,24	0,11
D1100									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,26	0,10
D1200									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,28	0,09
Ячеистые бетоны неавтоклавного твердения																			
D200	■	■	■	■														0,048	0,3
D250	■	■	■	■														0,06	0,28
D300	■	■	■	■														0,072	0,26
D350	■	■	■	■														0,084	0,25
D400	■	■	■	■														0,096	0,23
D450	■	■	■	■														0,108	0,21
D500	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		0,12	0,2
D600					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F35	0,14	0,16
D700					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,17	0,15
D800									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,19	0,14
D900									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F75	0,22	0,12
D1000									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F75	0,24	0,11
D1100									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,26	0,10
D1200									■	■	■	■	■	■	■	■	F15-F50	0,28	0,09

Примечание: ■ – теплоизоляционный бетон; ■ – конструктивно-теплоизоляционный бетон; ■ – конструктивно-теплоизоляционный / конструкционный бетон; ■ – конструкционный бетон

По данным Росстата доля ИЖС постоянно растет. Увеличение доли ИЖС наблюдается с 2020-2021 гг. В 2023 г. достигла 58 % в объеме общего ввода жилья в России.

На каждый 1 м² площади вводимых в эксплуатацию многоквартирных домов приходится около 0,2 м³ автоклавного газобетона. На каждый 1 м² площади малоэтажного строительства приходится около 0,6 м³ автоклавного газобетона, что составляет 87,5 % от общего потребления [24-26].

Высокий темп роста выпуска наблюдается у стенового материала – ячеистого бетона, что отражено на диаграмме доли рынка штучных строительных материалов за 2023 г, представленной на рисунке 1.2 [27].

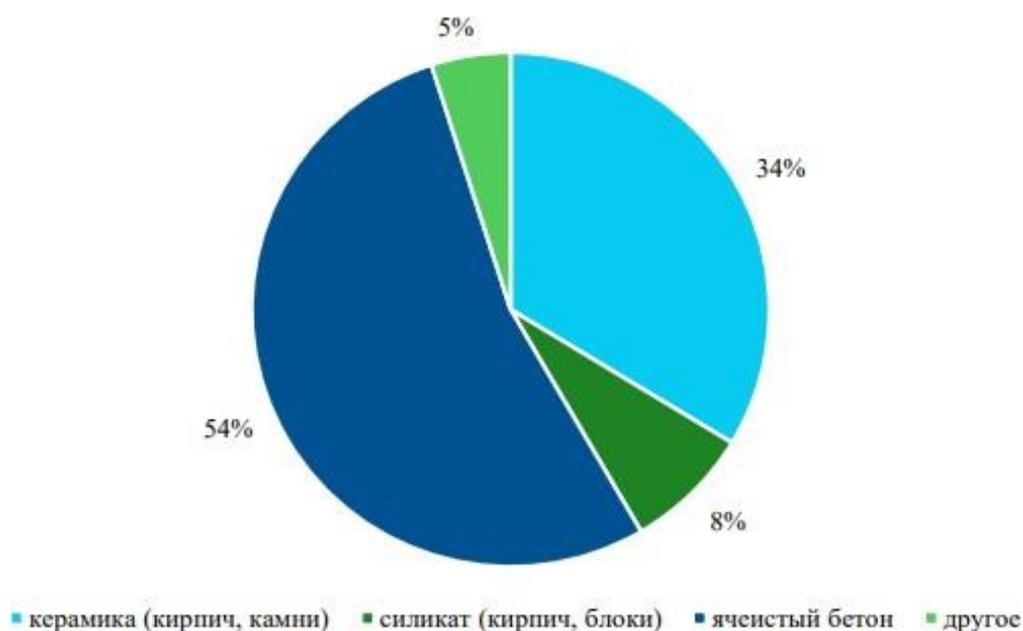


Рисунок 1.2 – Структура российского рынка стеновых штучных материалов по видам (по состоянию на 2023 г.)

В 2001 г. общий объем рынка составлял примерно 15 м³, причем жилья вводилось в 3 раза меньше, чем в настоящее время. Доля газобетона в небольшом объеме рынка была 6 %, а в настоящее время на долю газобетона приходится 54 % от общего объема производства стеновых штучных материалов. Рынок стеновых штучных материалов вырос в 2 раза с 2001 г., а объем строительства – больше чем в 3 раза, за счет уменьшения количества стен однослойных из конструкционно-теплоизоляционных материалов, и сильно увеличивается применение теплоизоляционных материалов на фасадах зданий, в результате рынок

теплоизоляционных материалов растет опережающими темпами, он прирастает быстрее, чем рынок газобетона.

С 2000 по 2015 гг. наблюдался рост объема производства ячеистого бетона, однако с 2016 по 2018 гг. спрос на продукцию ячеистого бетона и изделий на его основе медленно снижался, что представлено на рисунке 1.3 [27].

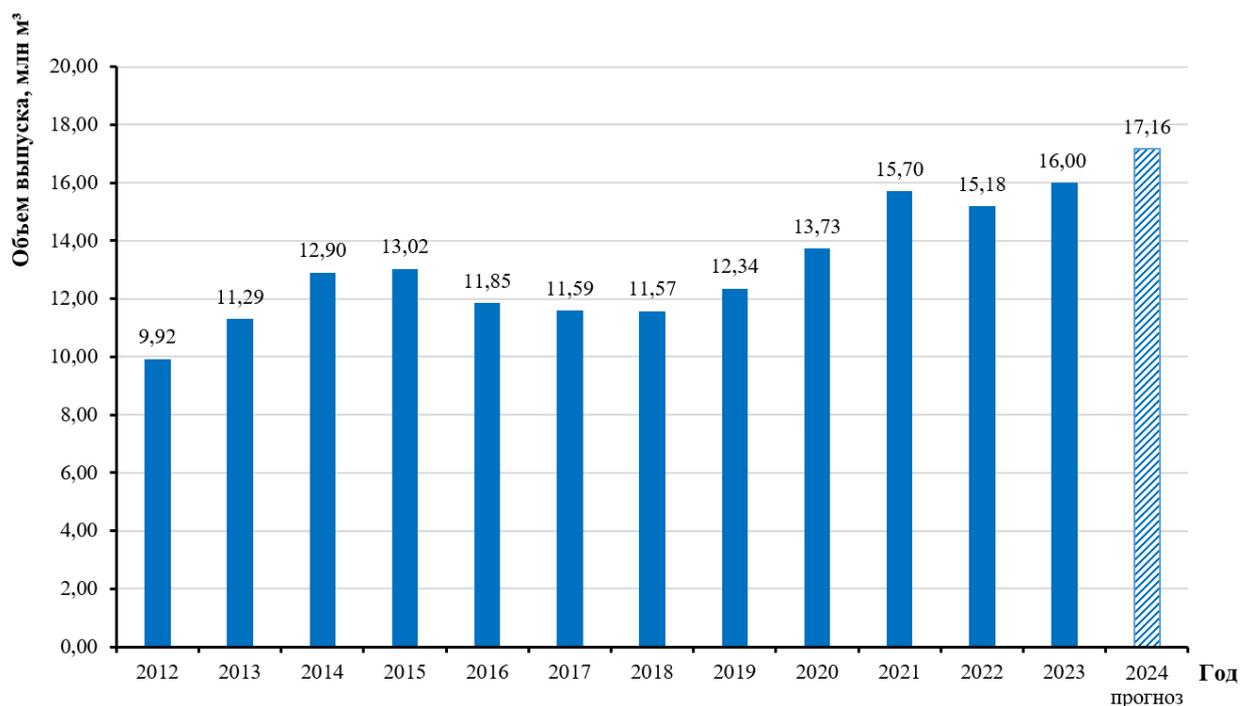


Рисунок 1.3 – Объем выпуска ячеистого бетона российскими производителями в период 2012-2023 гг. и прогноз на 2024 г.

В период с 2020 по 2021 гг. вырос объем выпуска ячеистого бетона. В 2022 г. произошел небольшой спад 3 %. В 2023 г., несмотря на ожидание спада до 5 %, наоборот, был получен прирост и выпуск ячеистого бетона составил 16 млн м³. Ожидается увеличение выпуска автоклавного газобетона в 2024 г. по данным производителей на 7,5 % с 16,0 до 17,16 млн м³ [27].

В зависимости от роста спроса на теплоизоляционный ячеистый бетон доля ячеистого бетона низких марок по средней плотности $D200-D400$ в общем объеме постепенно увеличивается. Изменение усредненного значения средней плотности выпущенной ячеистобетонной продукции представлено на рисунке 1.4.

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

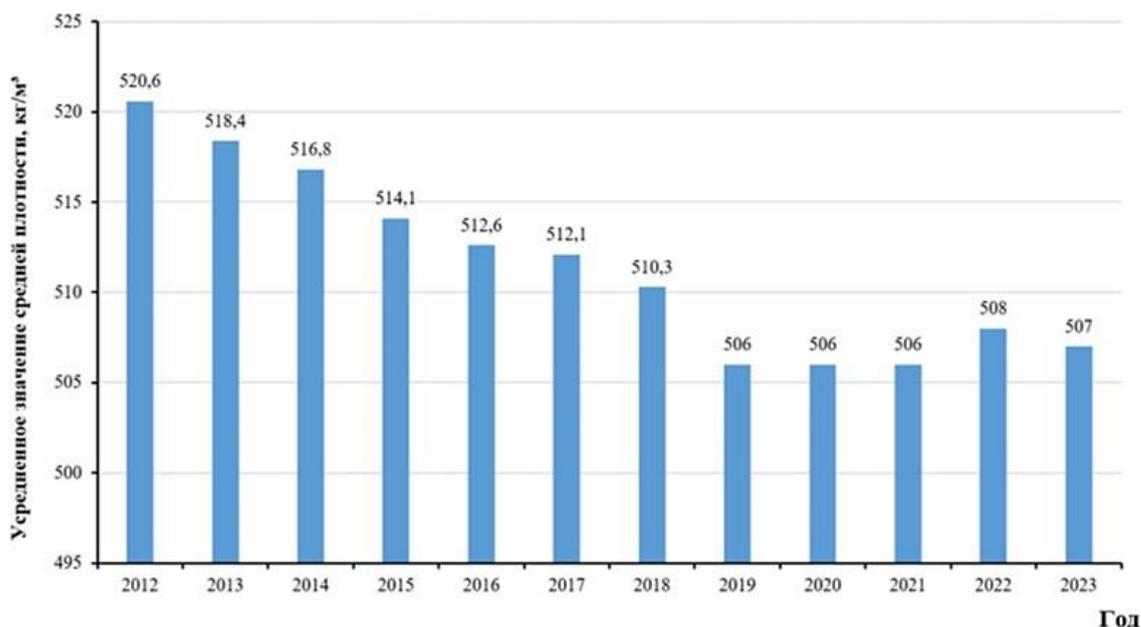


Рисунок 1.4 – Изменение усредненного значения средней плотности выпущенной ячеистобетонной продукции

На мировом рынке также наблюдается увеличение объема выпуска ячеистого бетона и изделий на его основе [28-33]. Развитие урбанизации и индустриализации, рост спроса на легкие и недорогие строительные материалы, обеспечивающие эксплуатационную надежность и экологическую безопасность зданий, стимулирует увеличение объема производства ячеистого бетона. Согласно прогнозу [34], объем мирового рынка газобетона возрастет с 18,8 млрд долл. в 2020 г. до 28,48 млрд долл. к 2025 г. при среднегодовом темпе роста 6,0 % в течение прогнозируемого периода (рисунок 1.5).

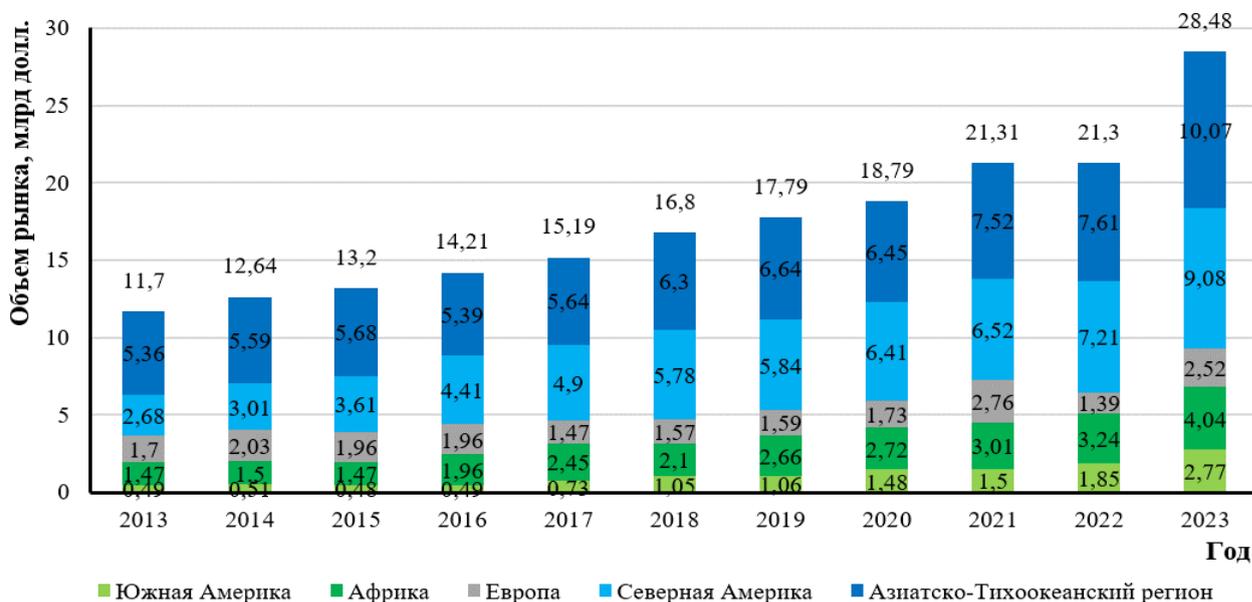


Рисунок 1.5 – Объем мирового выпуска ячеистого бетона в период 2013-2023 гг.

Выпуск армированных изделий в 2023 г. увеличился с 46 до 62 тыс. м³. Армированные изделия выпускались на 7 заводах.

К 2030 г. из-за роста строительства и растущего спроса на энергоэффективные и экологически чистые здания ожидается, что Азиатско-Тихоокеанский регион будет мировым лидером рынка прогнозируемого периода благодаря высокому экономическому развитию, увеличению государственных инвестиций в строительство и развитию инфраструктуры в таких странах, как Индия и Китай.

Анализ российского и мирового рынков показал, что ячеистый бетон является материалом с самыми высокими темпами роста производства, что объясняется потребностью в легких, ресурсосберегающих и экологически чистых материалах в жилищном строительстве.

1.2. Тепловыделение при твердении газобетона

Изучению процессов структурообразования вяжущих и бетонов посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых: А.А. Байкова, Ю.М. Бутта, П.П. Будникова, Р.Л. Бергера, С. Брунауэра, А.В. Волжинского, Дж. Вербек, Х. Ле-Шателье, Ф. Лоуренса, Ю.С. Малинина, В. Михаэлиса, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.Б. Ратинова, И.Н. Круглицкого, А.А. Пашенко, П.А. Ребиндера, М.Н. Сычева, В.В. Тимашева и других ученых.

Авторами [35-42] установлено, что с момента затворения вяжущего водой в смеси непрерывно происходят сложные физико-химические превращения, при этом параллельно протекают процессы растворения, гидратации, топохимические реакции, явление коагуляции, кристаллизации и др.

Твердение вяжущих веществ и бетонов относится к области сложных многостадийных физико-химических процессов, протекающих в дисперсных системах, взаимодействия в таких системах, а, следовательно, и исследования закономерностей проявления и природы вяжущих свойств, осложняются рядом

сопутствующих явлений, наложением эффектов одновременно протекающих элементарных реакций. Известно, что энергетические изменения при взаимодействии в дисперсных системах вызываются элементарными актами – адсорбцией, химической реакцией, зародышеобразованием, кристаллизацией и т.д. Их интенсивность и продолжительность на различных стадиях процесса достаточно полно отражается тепловыми эффектами реакций гидратации вяжущих веществ, носящих в целом экзотермический характер [43, 44].

Суммарный тепловой эффект, наблюдаемый при реакции гидратации цемента, складывается из основных составляющих, представленных на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Суммарный тепловой эффект при реакции гидратации цемента

Параметры тепловыделения при гидратации используются в технологии вяжущих веществ для выбора рациональных режимов производства, характеристик химического и минералогического составов, дисперсности в гранулометрии, добавок и т.д. [43].

Следует отметить, что скорость и суммарный эффект тепловыделения – важные характеристики, обеспечивающие соблюдение одного из основных принципов химической технологии вяжущих веществ и бетонов – соответствие параметров времени приложения, интенсивности и продолжительности регулирующих процессов твердения воздействию показателям скорости и полноты протекающих реакций [43].

Исследованию тепловыделения в цементах и бетонах посвящены работы отечественных и зарубежных авторов: С.В. Александровского, А.А. Байкова,

Д.П. Бенца, Р. Богга, М. Венюа, Г.Д. Вишневецкого, С.Л. Вольфсон, Г. Вудса, Н.Н. Данилова, Г. Де-Шуттера, И.Д. Запорожца, И.Б. Заседателя, В.А. Кинд, Р. Кондо, В. Лерча, В.С. Лукьянова, Н.Б. Марьямова, С.А. Миронова, О.П. Мчедлова-Петросяна, С.Д. Огорокова, Ш.Н. Плятта, Л.В. Сапожникова, Б.Г. Скрамтаева, Р. Старка, Г. Стейнор, А.В. Ушерова-Маршака, и других ученых.

1.2.1. Тепловыделение при взаимодействии цемента с водой

Комплекс физико-химических процессов, происходящих во время структурообразования цементных смесей, может быть наиболее полно охарактеризован через одну из характеристик процесса твердения – кинетику тепловыделения [43].

Экзотермичность процесса твердения вяжущего установлена еще в 1891 г. [45], и в 1906 г. установлено, что в зависимости от химического состава цементы имеют различный характер температурных кривых [46].

Авторами [47] предложено учитывать экзотермический эффект реакции гидратации цемента в бетоне при зимнем бетонировании.

Экспериментальные данные по исследованию тепловыделения отдельных клинкерных минералов, полученные учеными Р. Боггом, В. Лерчем, Г. Вудсом, Г. Стейнором, Р. Старком, В.А. Киндом, С.Д. Огороковым, С.Л. Вольфсон [48-52] представлены на рисунке 1.7.

По результатам данных рисунка 1.7 следует:

– по тепловыделению клинкерные минералы ранжируются следующим образом: $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$;

– основную массу тепла выделяют минералы C_3A и C_3S за короткий срок до трех дней, а минералы C_2S и C_4AF в первые дни выделяют незначительное количество тепла, а в дальнейшем тепловыделение проходит более интенсивно.

Тепловыделение соотносят с началом схватывания с максимальной интенсивностью экзотермии в период от 2,5 до 6,7 ч при температуре 20 °С для большинства цементов [53].

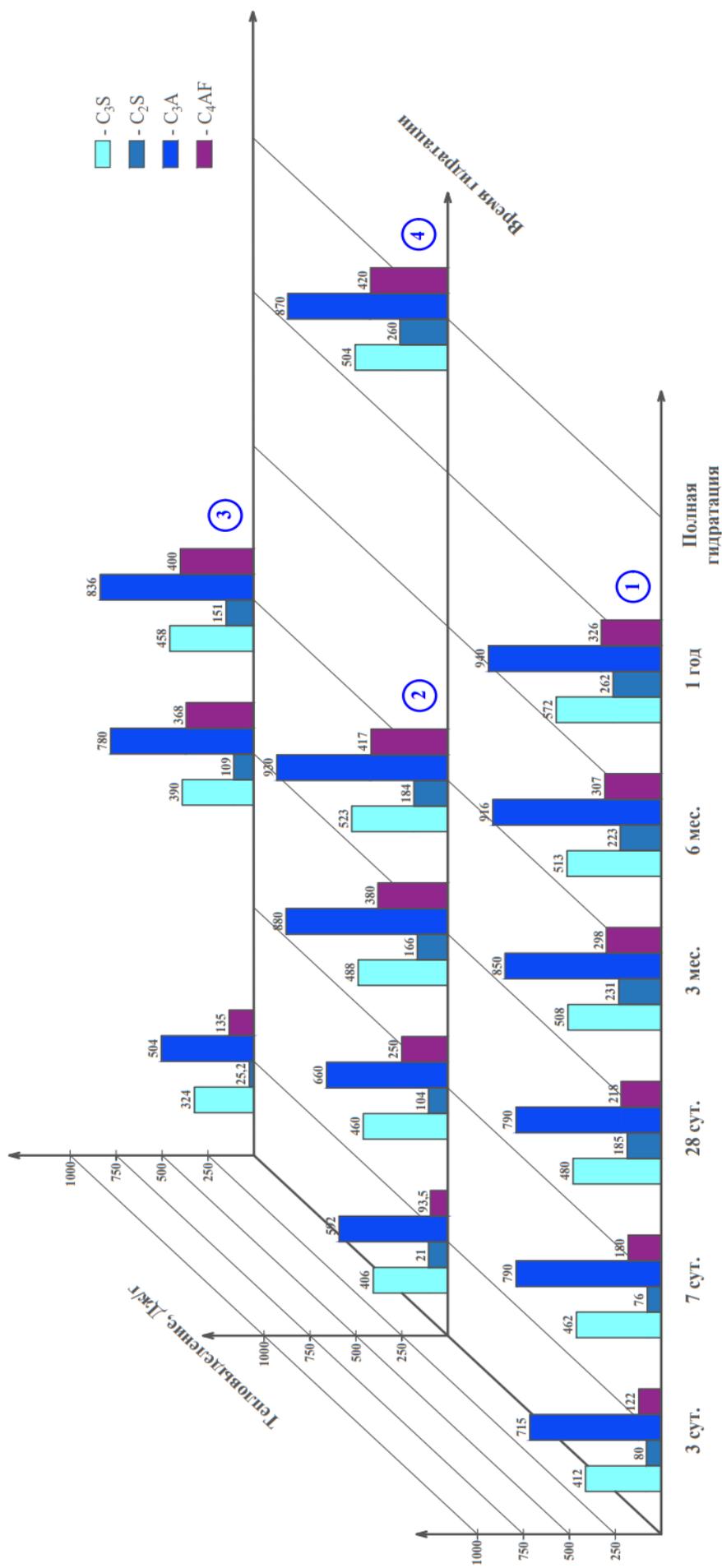


Рисунок 1.7 – Экспериментальные данные тепловыделения отдельных минералов клинкера [48-52]

Характерные периоды [54] и прогноз тепловыделения при гидратации портландцемента с использованием модели $f(\tau) = v^w \operatorname{arctg}(r\tau - u)$ [55] представлены на рисунке 1.8.

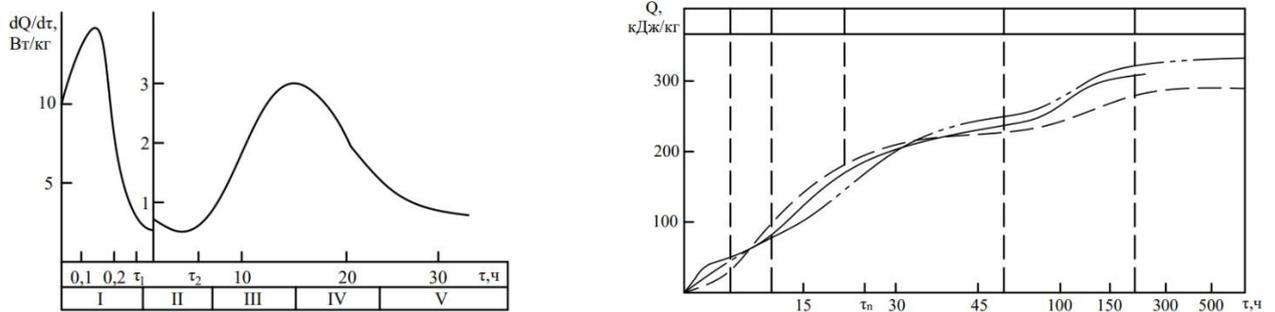


Рисунок 1.8 – Кинетика тепловыделения при гидратации портландцемента:

I – начальный период; *II* – индукционный период; *III* – ускоренный период; *IV* – замедленный период; *V* – период монотонного затухания

Экспериментальная зависимость $Q(\tau)$ (рисунок 1.8) – результат измерений в течение 7 суток тепловыделения при гидратации портландцемента со следующим минералогическим составом: C_3S – 51,0 %; C_2S – 31 %; C_3A – 1,5 % и C_4AF – 14 %.

Выделение тепла наблюдается сразу же после затворения цемента водой – это первый пик на кривой рисунка 1.8 и объясняется тепловым эффектом смачивания, это происходит непродолжительно и скорость тепловыделения падает до минимума. Далее скорость тепловыделения растет и через 4-8 ч достигает второго пика, именно к этому моменту схватывание цемента завершается. Затем наблюдается плавное снижение скорости тепловыделения цемента. Цементы с недостаточным количеством гипса отличаются появлением третьего пика.

Из рисунка 1.8 выделяются по экстремальным точкам зависимости $Q(\tau)$ ускоренный и замедленный периоды, более сложно выделение индукционного периода.

Начало индукционного периода τ_1 определяется сменой быстрого процесса медленным, конец τ_2 – переходом вновь к быстрому процессу. Точка τ_0 определяет окончательный переход к медленному монотонному затуханию.

1.2.2. Влияние различных факторов на тепловыделение цемента

Технология получения, гранулометрический состав, морфология кристаллов оказывают существенное влияние на кинетику тепловыделения полуводного сульфата кальция, интенсивность и длительность основных этапов процесса [43].

На процессы тепловыделения при гидратации цемента влияют множество факторов, которые можно классифицировать на общие и частные. Факторы, влияющие на тепловыделение при гидратации цементов представлены на рисунке 1.9.

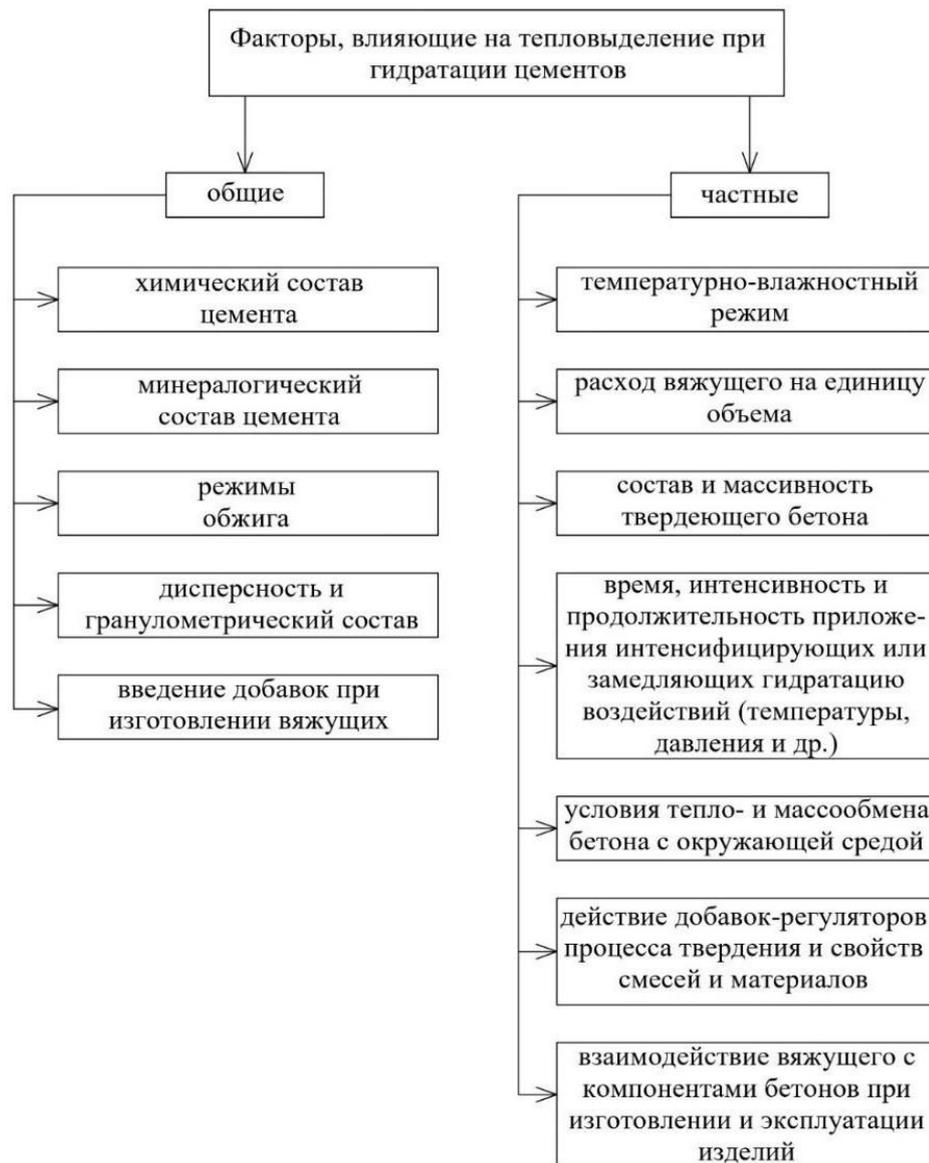


Рисунок 1.9 – Факторы, влияющие на тепловыделение при гидратации цементов

Тепловыделение цемента в бетонах – многофакторная система, это и термический потенциал вяжущего и внешние факторы, которые влияют прямо или косвенно на кинетику тепловыделения при гидратации цемента [56].

Начальная температура бетона существенно влияет на тепловыделение, кривая которого значительно меняется в течение 3-4 суток, а при низкой температуре происходит уменьшение тепловыделения, при этом интенсивность выделения тепла несущественна [56-58].

Многочисленные исследования ученых фиксируют, что повышение температуры ведет к увеличению интенсивности тепловыделения с главным пиком на ранних сроках твердения.

Влияние температуры на тепловыделение цемента описывается температурной функцией, которая представляет собой относительную скорость тепловыделения при заданной температуре по сравнению со скоростью тепловыделения при установленной температуре (принимается за единицу скорость тепловыделения при 20 °С). Сравнение скорости тепловыделения осуществляется в моменты, когда оно достигает равных значений [59].

Авторами [60, 61] введены переходные коэффициенты K , определена их физическая сущность и применена диффузионная кинетика к реакции гидратации:

$$K = \frac{\eta_t^2}{\eta_{15}^2} + \Delta, \quad (1.1)$$

где η_t – коэффициент кинематической вязкости воды при температуре t °С, Па·с; η_{15} – то же, при температуре 15 °С; Δ – поправка, учитывающая расхождение опытных данных с теоретическими.

Авторами [62] рекомендовано для большинства химических реакций зависимость константы скорости реакции K от температуры реакции в пределах от 4,4 до 110 °С определять по уравнению Аррениуса:

$$\ln K = -\frac{E}{R \cdot T} + const. \quad (1.2)$$

Зависимость скорости тепловыделения от температуры твердения дана авторами [63]:

$$f(t) = 2^{\frac{t-t_0}{10}}. \quad (1.3)$$

Авторами [64] установлена линейная зависимость для ε :

$$\varepsilon = a + bt, \quad (1.4)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от температуры твердения.

Авторами [65, 66] установлено изменение температурной разности ε не только в зависимости от температуры твердения, но и по мере роста общего количества выделившегося тепла.

Разработано и рекомендовано множество зависимостей, позволяющих определить тепловыделение, являющиеся функцией температуры и времени.

Экзотермию в адиабатических условиях описывает формула [67]:

$$q_{ц}(T) = q_{max} \left[\frac{t_0(1-e^{-B \cdot t_{max} \cdot T})}{t_0 + (t_{max} - t_0) \cdot e^{-B \cdot t_{max} \cdot T}} \right], \quad (1.5)$$

где t_0 – начальная температура процесса; B – параметр скорости адиабатического тепловыделения цемента в бетоне; t_{max} – максимальная температура адиабатического процесса в конце тепловыделения.

Результатом процессов, протекающих при схватывании и в начальной фазе твердения цемента является выделение тепла в бетоне. Скорость тепловыделения цемента может быть рассчитана по [68]:

$$\frac{dq}{dT} = (q_{max} - q) \cdot f(t), \quad (1.6)$$

$$q_{ад} = q_{max}(1 - e^{-aT}), \quad (1.7)$$

где a – коэффициент, зависящий от температуры.

И.Д. Запорожец [63] представил физико-химическую теорию тепловыделения бетона, согласно которой количество тепла Q , выделившегося за время T в 1 м^3 бетона, определяется уравнением:

$$Q = q' \cdot B_{A_0} \left\{ 1 - [(m - 1) \cdot B_{A_0}^{m-1} \int_0^T K[t(T)] dT + 1]^{-\frac{1}{m-1}} \right\}, \quad (1.8)$$

где q' – количество тепла, выделившегося при связывании цементом в реакции 1 кг воды; B_{A_0} – начальный запас активной воды в бетоне, $\text{кг}/\text{м}^3$; m – порядок реакции гидратации в воде; $K[t(T)]$ – константа скорости реакции гидратации.

Формула для изотермических условий имеет следующий вид [63]:

$$Q = Q_{max} [1 - (1 + A_t \cdot T)^{-0,833}], \quad (1.9)$$

где A_t – коэффициент темпа тепловыделения бетона при постоянной температуре твердения t °C (сут⁻¹).

По [69] тепловыделение определяется по выражению:

$$Q = \frac{T}{\alpha \cdot T + \beta}, \quad (1.10)$$

где α и β – параметры процесса тепловыделения.

В работе [70] установлено, что тепловыделение в бетоне – результат физико-химических процессов, протекающих при твердении цементного камня, и предложено определение тепловыделения:

$$q = q_v(1 + b_v + t) \cdot e^{-m_v T}, \quad (1.11)$$

где q_v , b_v , m_v , – параметры кусочно-постоянной функции времени, определяемые исходя из экспериментальных данных.

Автор [71] приводит зависимость для экзотермии цемента:

$$Q(T, t_0) = Q_{max}(1 - e^{-a_u(t_0)T}), \quad (1.12)$$

где $a_u(t_0)$ – функция начальной температуры раствора.

Тепловыделение в пропарочных камерах как функцию градусо-часов $V = t_\sigma \cdot T$ представили в работе [72]. Расчет производился для изотермических условий по формуле:

$$q_{ц} = 1,85 q_{28} \left(\frac{B}{Ц} \right)^{0,44} \cdot (1 - a \cdot e^{-b \cdot v}) \quad (1.13)$$

На ранних сроках рекомендуется определять тепловыделение по зависимости [73]:

$$Q_{ц}(T, t) = \beta \cdot T \cdot t, \quad (1.14)$$

где β – температурный коэффициент интенсивности экзотермии.

Авторами [74] предложено определять теплоту образования термодинамическим методом, основанным на законе Гесса.

Математическое описание кинетики гидратации цемента одновременно позволяет дать математическое описание процесса тепловыделения бетона.

Авторы [75, 76] применяют полулогарифмический закон нарастания прочности во времени при гидратации и твердении портландцемента и других вяжущих:

$$\sigma = a + b \cdot \lg \tau, \quad (1.15)$$

где a и b – константы, зависящие от состава, условий приготовления и твердения цементного камня; τ – время; σ – предел прочности цементного камня, МПа.

Для описания кинетики твердения вяжущих систем обоснована целесообразность применения, основанных на теории переноса [75]:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \cdot \sigma \quad (1.16)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \cdot \tau \quad (1.17)$$

где τ – время твердения, сут.; σ – предел прочности, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения, сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициент торможения процесса твердения.

Экзотермия бетона используется при зимнем бетонировании методом активного «термоса», учитывается при возведении специальных сооружений из железобетона типа башен, градирен, гидротехнических сооружений.

Авторы [77] предлагают использовать микроструктурную модель оценки теплового эффекта при гидратации цемента, основанную на последовательности циклов, каждый из которых рассматривает последовательно этапы растворения, диффузии и реакции взаимодействия цемента с водой.

Согласно [78], при постоянном водоцементном отношении тепловыделение можно представить как функцию произведения температуры бетона (цемента) на время:

$$\mathcal{Q} = t_{\theta} \tau, \quad (1.18)$$

где t_{θ} – постоянная температура цемента (бетона); τ – продолжительность нагрева.

На основании обработки экспериментальных данных для определения тепловыделения цемента выведена эмпирическая зависимость, кДж/кг:

$$Q = 1,85Q_{28} \left(\frac{B}{C} \right)^{0,44} (1 - a \cdot e^{-b\theta}) , \quad (1.19)$$

где Q_{28} – тепловыделение цемента при 28-суточном твердении в естественных условиях; (B/C) – водоцементное отношение; a, b – эмпирические коэффициенты.

Процессы тепловыделения цемента в бетонах характеризуются высокой сложностью из-за многофакторной природы системы и разнообразия условий, влияющих на нее. Это приводит к тому, что математическое описание этих процессов зачастую оказывается неразрешимым и может лишь приблизительно отражать числовые характеристики. Большинство исследователей основывают свои модели изменения температуры в результате тепловыделения цемента на общепринятом уравнении Аррениуса или его упрощенном варианте, представленном в виде температурной функции формулы Раструпа. Это позволяет обосновать утверждение о том, что кинетика тепловыделения цемента в бетоне подчиняется универсальным законам химии [56].

Полный тепловой эффект гидратации цемента складывается из суммы [63]:

$$q_n = q_{см} + q_x + q_{кр} + q_v + q_p , \quad (1.20)$$

где $q_{см}$ – теплота адсорбции воды на исходном порошке; q_x – химическая теплота гидратации; $q_{кр}$ – теплота кристаллизации новообразований; q_v – теплота адсорбции воды продуктами новообразований; q_p – теплота растворения цементных минералов в воде.

1.3. Порообразование в газобетонных смесях

Проанализирован опыт исследования структуры и свойств автоклавных газобетонов, представленный в работах Г.А. Амханицкого, П.И. Боженова, А.Т. Баранова, О.Я. Берга, В.А. Вознесенского, А.В. Волженского, В.Н. Гончарика, Ю.П. Горлова, К.Э. Горяйнова, М.И. Зейфмана, Д.Г. Земцова, М.Я. Кривицкого, И.Т. Кудряшова, Г.Я. Кунноса, Н.И. Левина, В.В. Макаричева, А.П. Меркина,

С.А. Миронова, В.А. Пинскера, Н.П. Сажнева, Г.П. Сахарова, Е.С. Силаенкова, А.Б. Солодовника, П.Р. Таубе, А.А. Федина, А.П. Филина, И.Б. Удачкина, А.А. Устенко, Т.А. Уховой, Е.М. Чернышова, Е.И. Шмитько, К.К. Эскуссона и зарубежных ученых – Э. Ву, А. Келли, Дж. Купера, С.Т. Милейко, Г.С. Холистера и других ученых [79-115]. Производство автоклавных газобетонов – быстро развивающаяся отрасль. Технология отличается гибкостью, высокой экономической эффективностью, экологически чистая и перспективна в плане расширения номенклатуры и повышения качества продукции. Многофункциональные свойства ячеистых бетонов определили его широкое применение в строительстве. Изделия из автоклавного бетона являются лучшим конструкционно-теплоизоляционным материалом для строительства зданий. Свойства изделий позволяют позиционировать продукт как материал самодостаточный для возведения однослойных стен.

В работах А.Т. Баранова, К.И. Бахтиярова, О.Д. Боброва, С.Ф. Бугрим, Ю.П. Горлова, Д.Г. Земцова, П.В. Корниенко, Г.И. Логинова, А.П. Меркина, В.А. Пинскера, А.Я. Пылаева, Г.П. Сахарова, А.Е. Терентьева, А.А. Устенко, А.И. Филатова, Л.П. Филина, А.Н. Чернова, А.И. Шумкова и других ученых, непосредственно касающихся пространственного распределения пор в ячеистом бетоне [116-128], рассматриваются обычно гексагональная, реже – кубическая и тетраэдрическая упаковка.

Оценивая значимость пористости в формировании строительно-технических свойств изделий целесообразно выделять виды пор и устанавливать их форму и размеры. В бетонах на неорганических вяжущих [129], и в ячеистых бетонах в частности [130, 131], выделяют гелевую, капиллярную и воздушную (газовую) пористость. Для гелевой и капиллярной пористости в газобетоне могут быть сформулированы постулаты, а для газовых пор произведено разделение на виды и выявлена роль размера пор в формировании структуры [132].

Гелевая пористость предопределяется количеством и видом вяжущих в газобетонной смеси. Она достоверно оценивается по Т. Пауэрсу [133] величиной 28 % от объема гидросиликатных новообразований. Так, для модельной смеси

газобетона $D500$ с количеством активного CaO 112 кг/м^3 гелевая пористость тоберморита составляет $53,3 \text{ л/м}^3$. Капиллярная пористость газобетона зависит от количества воды в смеси. Согласно СН 277-80 для $D500$ при литьевой технологии $V/T = 0,6$ и расход воды составит 270 л/м^3 . Это дает расчетную величину капиллярной пористости 180 л/м^3 . При ударной технологии $V/T = 0,4$ и количество воды в смеси 180 л/м^3 . Соответственно капиллярная пористость газобетона ожидается на уровне 90 л/м^3 , что в два раза ниже. Приведенные данные по существенному различию в капиллярной пористости целесообразно принимать во внимание при оценке технологии: ударная или литьевая [134].

Гелевокапиллярная пористость является рецептурным последствием, однозначно определяемым составом газобетонной смеси. Размер гелевых пор менее 50 нм , а диаметр капиллярных пор от 50 нм до 10 мкм . Контракционная пористость образуется в твердеющей системе за счет меньшего объема гидратных новообразований в сопоставлении с суммарным объемом реагирующих минералов вяжущего и стехиометрического количества воды. Ее объем для модельного состава газобетона $D500$ составляет величину порядка 5 л/м^3 . Контракционную пористость рекомендуется в газобетоне не выделять в отдельный вид, а присовокупить к капиллярной пористости.

Водород, образующийся в газобетонной смеси, формирует основную пузырьковую пористость. Модель газобетонной смеси при вспучивании может быть представлена двухфазной системой с единичной ячейкой растущего пузырька водорода как дисперсной фазой и дисперсионной средой в виде теста вяжущих и наполнителя. Взаимодействие дискретной частицы с окружающим ее объемом сплошной фазы в механике двухфазных систем изучают методом единичной контрольной ячейки [135]. Ячейка содержит одну дискретную частицу (пузырек пара и газа или твердую частицу) и прилегающую к частице область несущей сплошной фазы. Выявленные закономерности поведения дискретной частицы как единичной ячейки позволяют адекватно характеризовать двухфазную систему в целом.

Пузырек газа в жидкой фазе оценивают его объемом V и характерным линейным размером l . Поведение пузырька как единичной ячейки в газобетонной

смеси рассмотрено с использованием аппарата теории подобия. Числа (критерии) подобия представляют собой меру отношения сил, действующих в объемах соприкасающихся фаз и на границе раздела этих фаз. Силы отнесены к единице площади раздела фаз. Исходя из сохранения импульса для пузырьков использованы следующие оценки:

$$- \text{силы инерции } f_i \sim \rho_{\text{ж}} w^2; \quad (1.21)$$

$$- \text{силы тяжести (архимедовы силы): } f_g \sim g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})l; \quad (1.22)$$

$$- \text{силы вязкости } f_{\eta} \sim \eta_{\text{ж}} w/l. \quad (1.23)$$

Для нормальной компоненты импульса на границе раздела фаз «газ – жидкость» (формулы Лапласа) сила поверхностного натяжения:

$$f_{\sigma} \sim \sigma/l. \quad (1.24)$$

В приведенных соотношениях $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{г}}$ плотности дисперсионной среды и газовой фазы, w – характерная скорость процесса, l – размер ячейки, $\eta_{\text{ж}}$ – вязкость среды, σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз.

Для технологии ячеистых бетонов важно то, что из указанных сил только сила поверхностного натяжения направлена на придание пузырьку сферической формы за счет стремления к минимальной избыточной свободной энергии границы раздела фаз. Три остальные силы в общем случае обуславливают деформацию пузырька. Соотношение деформирующих и стабилизирующих пузырек сил выражают следующими числами подобия:

$$\frac{f_g}{f_{\sigma}} = \frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})l^2}{\sigma} = Bo \quad - \text{число Бонда};$$

$$\frac{f_i}{f_{\sigma}} = \frac{\rho_{\text{ж}} w^2 l}{\sigma} = We \quad - \text{число Вебера};$$

$$\frac{f_{\eta}}{f_{\sigma}} = \frac{\eta_{\text{ж}} w}{\sigma} = N \quad - \text{вязкостно-капиллярный критерий}.$$

Сферичность газового пузырька определяется преобладанием капиллярных сил и имеет вид:

$$Bo \ll 1; We \ll 1; N_{\eta\sigma} \ll 1. \quad (1.25)$$

Первое из неравенств определяет статическое условие недеформируемости сферического газового пузырька, что существенно для оценок его размера. Два других неравенства определяют динамические условия сферичности при росте размера пузырька в газобетонной смеси.

Пузырек в жидкой фазе может быть дополнительно охарактеризован уравнениями подобия, составленными из трех чисел подобия Bo , We и $N_{\eta\sigma}$. Так отношение сил инерции к силам тяжести дает число Фруда:

$$F_r = \frac{We}{Bo} = \frac{f_i}{f_g} = \frac{(\rho_{ж} w^2)}{g \rho_{ж} - \rho_{г} \cdot l} \approx \frac{w^2}{gl} \quad \text{— число Фруда.}$$

При анализе движущегося газового пузырька используется число Рейнольдса (R_e), которое представляет собой отношение инерционных сил к вязким силам. В области, где $R_e > 1$, сферическая форма пузырька становится заметной при условии, что $We \ll 1$. Исследования вязких течений показывают, что даже при $R_e \ll 1$ возможная деформация пузырька определяется исключительно соотношением инерционных сил и сил поверхностного натяжения, то есть числом Вебера. Это объясняется тем, что при чисто вязком обтекании пузырька полное нормальное напряжение на границе раздела фаз остается постоянным во всех точках межфазной поверхности и не приводит к деформации пузырька, а лишь компенсирует избыточное давление внутри пузырька, вызванное кривизной поверхности раздела.

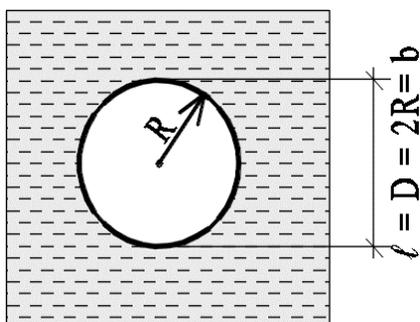


Рисунок 1.10 – Схема к статическому условию оценки устойчивости газового пузырька

Оценка устойчивости газового пузырька в жидкой дисперсионной среде позволяет обосновать верхний предел размера газовых пор в ячеистом бетоне. Устойчивость пузырька в газобетонной смеси определяет статическое условие недеформируемости, количественно характеризуемое числом Бонда. Число Бонда $Bo = 1$ свидетельствует о равенстве архимедовых сил и сил поверхностного

натяжения для газового пузырька (рисунок 1.10).

Линейный масштаб для газового пузырька со сферической оболочкой при равенстве статических сил является капиллярной постоянной или константой Лапласа, определяемой по формуле:

$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}} \quad (1.26)$$

Значение b для большинства жидкостей равно 1-3 мм. Вода с величиной поверхностного натяжения $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² при 20 °С, плотностью $\rho = 10^3$ кг/м³ и $g = 9,81$ м/с² имеет величину капиллярной постоянной $b' = 2R' = 2,72 \cdot 10^{-3}$ м. Для пузырька в ячеистобетонной смеси с $\rho = 1,8 \cdot 10^3$ кг/м³ $b'' = 2R'' = 2,03 \cdot 10^{-3}$ м. Снижение величины поверхностного натяжения с повышением температуры, например, до $\sigma = 62,61 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² при 80°С, дает уменьшение радиуса до $2R'_{t=80^{\circ}\text{C}} = 1,88 \cdot 10^{-3}$ м, то есть температурное изменение σ не оказывает принципиального влияния на размер газового пузырька. В ячеистобетонных смесях в присутствии поверхностно-активных веществ поверхностное натяжение на границе раздела фаз существенно снижается. Пусть поверхностное натяжение в смеси уменьшилось в 2 раза и составило величину $36 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² при плотности смеси $\rho = 1,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Тогда капиллярная постоянная и, соответственно, радиус газового пузырька $b''' = 2R''' = 1,43 \cdot 10^{-3}$ м.

Выполненная оценка позволяет относить газовые пузырьки с диаметром менее 2 мм в смесях ячеистого бетона к пузырькам устойчивой формы или лапласовым. Соответственно, пузырьки с $D > 2$ мм будут характеризоваться в ячеистобетонных смесях неустойчивостью формы.

Современные технологии газобетона позволяют получать смеси с преимущественным диаметром пор до 2 мм, в том числе и в теплоизоляционных ячеистых материалах с высокой долей объема газовой фазы. Увеличение размера пузырьков в жидкой фазе свыше 2 мм должно приводить к их деформированию, а также к пульсации формы пузырька под действием сил поверхностного натяжения из-за переменной кривизны межфазной поверхности.

Исследователями [11] определено, что оптимальная макроструктура характеризуется высокой степенью поризации материала, равномерным распределением пор в бетоне, рациональным распределением ячеек по размерам и малой дефектностью межпоровых перегородок. При этом остаются открытыми вопросы создания ячеистых бетонов бездефектной высокоорганизованной структуры с учетом термических процессов ее формирования при отсутствии пор воздухововлечения и сегментных пузырей в газобетонной смеси.

Под высокоорганизованной структурой газобетона следует понимать структуру газобетона, формируемую с минимальными температурными градиентами массива при отсутствии пор воздухововлечения и сегментных пузырей.

Исследования дефектов структуры ячеистых бетонов и причин их возникновения отражены в работах [136-142].

В работах [136-139] исследованы дефекты газобетонных изделий, возникающие в процессе их производства и эксплуатации. Основное внимание уделяется трещинам, возникшим из-за несоответствия процессов вспучивания и твердения, а также усадочным трещинам, которые проявляются после резки. Установлены факторы, способствующие возникновению этих дефектов, и предложены рекомендации по их предотвращению, включая оптимизацию технологии производства, изменение состава вяжущих и регулирование температурных режимов. Классификация трещин и дефектов структуры приведена на рисунке 1.11 [136-138].

Основная часть дефектов, выявляемых по завершении процесса производства изделий из ячеистых бетонов автоклавного твердения, формируется на стадии их формирования. В большинстве случаев эти дефекты проявляются в процессе созревания газобетона, когда происходит его затвердевание и структурное уплотнение. Тем не менее, трещины могут также возникать после завершения выдержки, что связано с транспортировкой изделий или их последующей обработкой на следующих этапах технологической линии. Кроме того, трещины в газобетоне могут быть вызваны множеством факторов, включая

неподходящие условия хранения, температурные колебания, механические воздействия и несоответствие технологическим требованиям на различных этапах производства [136].

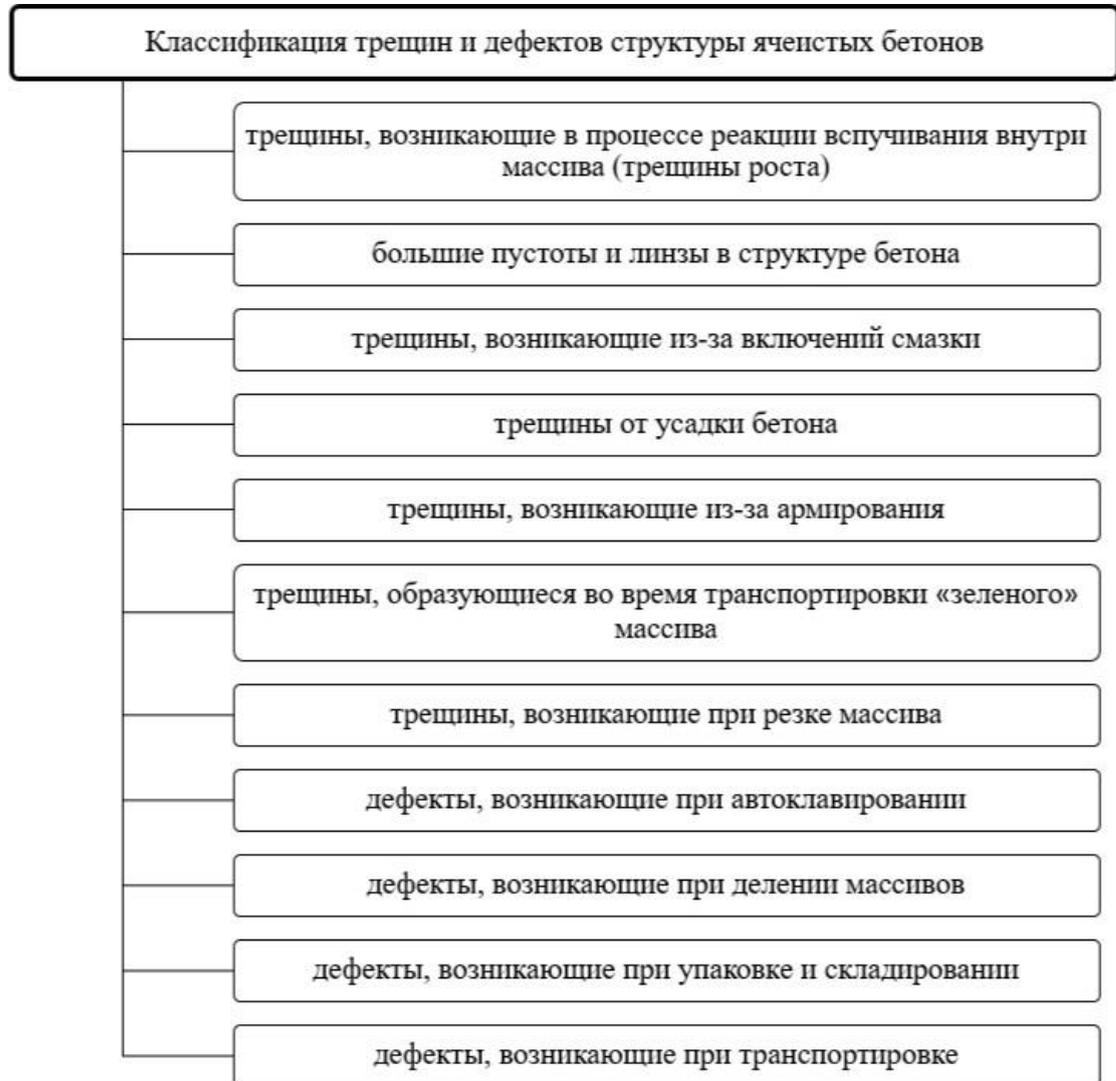


Рисунок 1.11 – Классификация трещин и дефектов структуры ячеистых бетонов

В работах [136, 138] рассмотрена классификация дефектов структуры автоклавных газобетонов по типам. Расслоения и усадочные трещины возникают из-за несоответствия процессов вспучивания и твердения массивов. Эти дефекты обусловлены несколькими факторами: несоответствие скоростей роста объема и твердения газобетона, чрезмерное давление водорода и водяного пара внутри массива, а также повышенная вязкость и низкая газо- и паропроницаемость материала. Трещины, обусловленные усадочными процессами в свежем массиве, возникают при интенсивном высыхании верхнего слоя и низком водотвердом

отношении смеси. Механические дефекты, такие как сколы и трещины, вызваны неправильным расположением струн при резке, неравномерной скоростью движения резательной тележки и другими факторами.

Исследование трещинообразования в готовых изделиях из газобетона [140] выявило, что основными факторами, влияющими на этот процесс, являются не только качество сырьевых материалов, но и особенности технологии их производства. В ходе анализа образцов газобетонных блоков двух предприятий было установлено, что более плотная и закристаллизованная структура газобетона в значительной степени связана с особенностью процесса автоклавирования. Для повышения качества газобетонных изделий рекомендуется оптимизация режимов автоклавирования, направленная на улучшение кристаллической структуры гидросиликатной матрицы [141].

Формирование пористой структуры автоклавного газобетона является многофакторным процессом, в значительной степени зависящим от оптимизации технологических режимов и качественных характеристик используемых компонентов. Одним из ключевых факторов, влияющих на свойства конечного продукта, является время перемешивания газобетонной смеси. Увеличение этого времени позволяет достичь более равномерного распределения пузырьков газа по объему смеси, что, в свою очередь, способствует созданию однородной пористой структуры. В случае недостаточного перемешивания могут возникать линзы и пустоты, что негативно сказывается на прочностных характеристиках и теплоизоляционных свойствах готового материала [141].

При этом использование алюминиевой пудры с низкой насыпной плотностью приводит к замедленному газовыделению. Это замедление может стать причиной образования трещин в верхних слоях газобетонного массива. Такие трещины возникают вследствие несоответствия между временем, необходимым для газообразования, и периодом схватывания цементного теста. Для решения этой проблемы авторы [141] рекомендуют применение пластификаторов, которые способны улучшить реологические характеристики смеси, а также коррекцию температуры воды, используемой в процессе приготовления. Эти меры

способствуют стабилизации процесса вспучивания и снижению числа недоростов, что существенно улучшает качественные характеристики конечного продукта.

Исследование структуры автоклавных газосиликатов [142] выявляет значительное влияние минералогического состава и степени кристаллизации на прочностные характеристики материала. Установлено, что кристаллизационные и конденсационно-кристаллизационные связи играют ключевую роль в формировании прочности цементного камня. В ходе экспериментов с добавлением гипса было обнаружено, что оптимальная дозировка (1-2,5%) способствует улучшению прочности и уменьшению времени твердения, в то время как избыток гипса (более 12%) негативно сказывается на свойствах изделий, приводя к снижению прочности и образованию дефектов [142].

Таким образом, оптимизация технологических параметров и контроль за качеством исходных компонентов имеют решающее значение для повышения прочности и долговечности автоклавного газобетона. Учет возможных дефектов, возникающих в процессе производства, позволит снизить риск формирования некачественной продукции и улучшить эксплуатационные характеристики изделий.

1.4. Пути повышения эффективности производства автоклавного газобетона

Для обеспечения оптимальных условий для формирования газовых пузырьков и удержания большего количества образующейся газовой фазы в ячеистобетонной смеси, т.е. устранения газовыделения смеси через поверхность формируемого массива, образования макропористости, дефектов структуры и создания наиболее плотной упаковки из газовых пор используются многочисленные приемы и методы, а именно: введение в газобетонную смесь различных добавок и модификаторов с физико-химическим механизмом воздействия; применение механических воздействий, основывающихся на эффекте тиксотропного и квазиразжижения (вибрации, удар, раскачивание смеси и другое) и их комбинации [143-159].

Формирование ячеистой структуры также зависит от текучести смеси, количества извести в составе известково-цементного вяжущего и количества алюминиевой пудры.

Авторами [160] было изучено влияние различных рецептурно-технологических факторов, и установлено, что для получения бездефектной ячеистой макроструктуры газобетона средней плотности $D500$ оптимальными технологическими параметрами являются: состав известково-цементного вяжущего в соотношении 50 : 50 мас. %, содержание алюминиевой пудры в пределах 0,10-0,12 мас. %, диаметр расплыва смеси, измеренный на вискозиметре Сутгарда, равный 33 см, и температура формовочной смеси 303 К. При указанных технологических параметрах вязко-пластичные свойства газобетонной смеси способствуют активному образованию многочисленных пузырьков газа при незначительном давлении внутренней газовой фазы, при этом не наблюдается объединение газовых пузырьков в более крупные поры. После завершения газообразования происходит схватывание смеси с образованием макроструктуры, характеризующейся наличием сферических пор размером до 1-1,5 мм и бездефектными межпоровыми перегородками.

Исследования, проведенные авторами [161], показали, что формирование ячеистой структуры теплоизоляционного газобетона может быть эффективно контролируемо через целенаправленное регулирование реологических свойств, кинетики газовыделения и температурного режима, а также за счет введения пластификаторов в состав сырьевой смеси. В частности, модификация газобетонной смеси с использованием суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров «MELFLUX 5581F» позволила стабилизировать процесс структурообразования газобетона, что привело к снижению плотности образцов материала на 23 %. Кроме того, добавление пластификатора способствует предотвращению осадки массы в период набора пластической прочности, стабилизации реологических характеристик газобетона и уменьшению объема микропор в структуре вяжущей матрицы.

Экспериментальные данные подтвердили теоретические основы формирования оптимальной структуры ячеистого бетона [162]. Было продемонстрировано, что существует реальная возможность оптимизации составов и методов производства ячеистого бетона. Прочность газобетона, изготовленного различными способами с использованием предложенного метода, превышает нормативные значения для

различных объемных масс в среднем на 20-40 %. Влажность газобетона после автоклавной обработки составляет 13-19 %. С учетом повышенной плотности межпоровых перегородок, сопротивление паропроницанию газобетона с объемной массой 600-700 кг/м³, согласно полученным данным, увеличивается на 30-70 % по сравнению с расчетными значениями. Это будет способствовать улучшению тепловлажностного режима ограждающих конструкций.

Обоснованы научные подходы и методические структуры поризованных бетонов авторами [163, 164]. Предложены оптимальные параметры приготовления поризуемых бетонных смесей с устойчивой пенистой структурой.

Эффективным методом получения газобетона с заданной плотностью является использование специализированного газообразующего компонента, а именно алюминиевой пасты «СТАРА Alupor N905» (Германия) в качестве порообразователя [165]. Замена в составе автоклавного газобетона алюминиевой пудры «ПАП-1» на специализированный газообразователь «СТАРА Alupor N905» позволила снизить плотность образцов на 15-20 % за счет формирования гексагональной ячеистой структуры материала, а также стабилизировать процессы газообразования и вспучивания ячеистобетонного массива.

Авторами [166] была разработана технология производства стеновых материалов автоклавного твердения с использованием глинистых пород на незавершенной стадии минералообразования, что позволяет сократить время и давление автоклавирования до 2-4 атм. Применение таких пород дает возможность управлять процессами структурообразования автоклавных материалов нового поколения. В результате синтезируются новообразования различного состава и морфологии, формирующие цементирующие соединения оптимального состава, что обеспечивает высокие физико-механические свойства изделий.

Предложена обширная номенклатура эффективных автоклавных материалов на основе данного сырья, включая стеновые, отделочные, конструкционно-теплоизоляционные и акустические материалы. Использование таких пород не только расширяет сырьевую базу для материалов автоклавного твердения и снижает

энергоёмкость их производства, но также улучшает экологическую ситуацию и создает комфортные условия для проживания человека.

Авторами [167-169] были разработаны модели, позволяющие оптимизировать начальные свойства формовочной смеси и прогнозировать поведение процесса тепловыделения при целенаправленном изменении значений рецептурно-технологических факторов и их влияния на прочностные характеристики ячеистого бетона. Разработка и применение мультипараметрической модели позволили согласованно провести оптимизацию на всех масштабных уровнях формирования структуры ячеистого бетона.

Исследования авторов [170] показали, что характеристики газобетона автоклавного твердения могут быть улучшены путем увеличения прочности межпоровых перегородок с помощью направленного синтеза низкоосновных гидросиликатов кальция высокой прочности, повышения общей связанности композита методом микроармирования бетона низко модульной фиброй, а также оптимизации поровой структуры благодаря рациональному выбору газообразователя и подвижности бетонной смеси. Доказана эффективность применения низко модульной микроцеллюлозы в количестве до 2,4 % от массы твердых компонентов армирующих волокон для повышения прочности бетонной матрицы на 40-60 %.

Предложены принципы проектирования газобетона автоклавного твердения с использованием наноструктурированного модификатора силикатного состава, которые заключаются в оптимизации макро- и микроструктуры газобетона в доавтоклавный период и интенсификации фазообразования в гидротермальных условиях [171]. Наноструктурированный модификатор позволяет оптимизировать реотехнологические свойства ячеистобетонной смеси, что обеспечивает интенсивный процесс газообразования, увеличение объема смеси, сокращение времени вспучивания и уменьшение толщины межпоровых перегородок при сохранении необходимых прочностных характеристик готовых изделий.

Совершенствованию технологии производства и повышения качества энергоэффективных газосиликатных материалов автоклавного твердения с повышением их долговечности посвящены работы [172, 173].

Предложено управление размерами готовых пузырьков за счет эффективного технологического решения [174-176], заключающегося в использовании давления внешней газовой фазы, что позволяет управлять процессом макроструктурообразования в литьевой технологии газосиликата.

Установлено, что стабильность формируемой ячеистой структуры может быть обеспечена при условии компенсации растягивающих напряжений в межпоровых перегородках результирующими сжимающими силами от внешнего давления до достижения растворной составляющей необходимой прочности. В контексте сжимающих внешних давлений значительную роль играет искусственно создаваемое дополнительное давление внешней газовой фазы, которое следует рассматривать как ключевой технологический фактор, позволяющий оперативно регулировать процесс.

В работе [177] показано, что применение химически активных соединений алюминия, хлора, щелочных металлов и солей серной кислоты способствует повышению прочности силикатного камня автоклавных материалов за счет формирования цементирующих новообразований сложного состава с повышенной степенью конденсации кремнекислородных анионов и преобладанием ковалентных связей в их структуре. Практическая реализация данного подхода была осуществлена [177, 178]: сырьевая шихта имела следующий состав (в мас. %): 10,2-15,8 гранулированного шлака с активностью 0,2 и модулем основности 1,04; 2,4-3,5 полуводного гипса; 1,5-1,9 хлористого натрия. Активность смеси (по CaO) составила 20-21 %, а подготовка осуществлялась совместным сухим помолем всех компонентов. Из указанной смеси был получен ячеистый бетон средней плотностью 550 кг/м³ и маркой 35, который демонстрирует до 1,5 раза более высокую прочность на растяжение при изгибе и сниженную влажностную усадку в 1,7-2 раза – $\varepsilon_y = 0,25$ мм/м.

1.5. Выводы

Анализ российского и мирового рынков показал, что ячеистый бетон является материалом с самыми высокими темпами роста производства, что объясняется потребностью в легких, ресурсосберегающих и экологически чистых материалах в современном строительстве.

Производство автоклавных газобетонов – быстро развивающаяся отрасль. Технология отличается гибкостью, высокой экономической эффективностью, экологически чистая и перспективна в плане расширения номенклатуры и повышения качества продукции. Многофункциональные свойства ячеистых бетонов определили его широкое применение в строительстве. Изделия из автоклавного бетона являются лучшим конструкционно-теплоизоляционным материалом для строительства зданий. Свойства изделий позволяют позиционировать продукт как материал самодостаточный для возведения однослойных стен.

Формирование пористой структуры в газобетонной смеси является наиболее ответственным технологическим процессом при изготовлении газобетонных изделий. Однако химизм и механизм газообразования, гидратации извести и цемента, и их совокупная роль в процессе формирования пористой структуры все еще являются дискуссионными и требуют дальнейшего изучения. Отсутствуют данные о взаимосвязи параметров экзотермических процессов и принципов управления тепловой самообработкой в газобетонной смеси с учетом энергетического потенциала ингредиентов и других значимых для технологии факторов.

Исследователями определено, что оптимальная макроструктура характеризуется высокой степенью поризации материала, равномерным распределением пор в бетоне, рациональным распределением ячеек по размерам и малой дефектностью межпоровых перегородок. При этом остаются открытыми вопросы создания ячеистых бетонов бездефектной высокоорганизованной структуры с учетом термических процессов ее формирования при отсутствии пор воздухововлечения и сегментных пузырей в газобетонной смеси.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Экспериментальные исследования были проведены в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова в лабораториях кафедр «Строительного материаловедения, изделий и конструкций» и «Технологии цемента и композиционных материалов», Центра высоких технологий, испытательном центре «БГТУ-сервис», в лабораториях и на технологических линиях предприятий ЗАО «АэроБел», ООО «Масикс».

Показатели качества применяемых материалов, их количественное и процентное соотношение, разработка цементно-минеральных суспензий, изучение составов, свойств и технологий получения газобетона, в том числе технологические параметры газобетонных изделий, были исследованы с помощью теоретических и экспериментальных способов, обработки полученных результатов на лабораторных образцах, произведенных и испытанных на оснащении лабораторий, и испытательных центров университета. Использовался комплексный научный анализ современных исследований и системно-структурный подход.

2.1. Методы исследований

2.1.1. Методика изучения состава и структуры сырьевых компонентов

Минеральный состав и структура образцов исходных сырьевых компонентов и изготовленных материалов были исследованы с использованием методов рентгеновской дифрактометрии и растровой электронной микроскопии. Кинетика твердеющих газоцементных систем изучалась в псевдоадиабатических условиях с применением электронно-регистрающих устройств и стандартных калориметров.

Рентгенофазовый анализ проводился на диффрактометре ДРОН-3 (НПО «Буревестник», Санкт-Петербург) с использованием методов паст и порошков. Для порошкового анализа образец обезвоживался в ацетоне и сушился при температуре 333 К.

Параметры съемки рентгенограмм следующие: антикатод – медный; излучение – $\text{CuK}\alpha$; фильтр – Ni; размеры первой и второй щелей, ограничивающих рентгеновский пучок – 10x1 мм; щель у счетчика – 0,25×100 мм; скорость вращения счетчика – 14 град/мин; напряжение на трубке – 20 кВ; ток трубки – 25 мА.



Рисунок 2.1 – Микроскоп TESCAN MIRA 3LMU

Изучение микроструктуры полученных образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3LMU (рисунок 2.1).

TESCAN MIRA представляет собой сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) четвертого поколения с катодом Шоттки, который позволяет получать СЭМ-изображения и проводить анализ элементного состава в реальном времени через единое программное обеспечение TESCAN Essence™. Это значительно упрощает процесс получения данных о морфологии поверхности образца и его локальном элементном составе, делая TESCAN MIRA эффективным инструментом для регулярного контроля качества материалов и изделий, анализа отказов и выполнения различных лабораторных исследований. Модернизированная колонна электронного микроскопа TESCAN MIRA управляется усовершенствованной электроникой, которая обеспечивает мгновенный переход от режима получения изображений при высоких увеличениях к режиму анализа элементного состава образцов без необходимости механической смены апертур или юстировки каких-либо элементов внутри колонны.

Определение тепловыделения газобетона в адиабатических условиях основано на методике, изложенной в ГОСТ 24316-2022 [179]. Поскольку в экспериментах использовались газобетонные смеси значительных объемов, проведение исследований тепловыделения в адиабатических условиях оказалось технически невозможным. Поэтому были смоделированы термосные условия твердения газобетонных смесей, максимально приближенные к реальным условиям, характерным для промышленного производства.

Исследование кинетики тепловыделения при гидратации цемента в газобетоне проводилось путем регистрации изменений температуры в массиве газобетона в условиях адиабатического (псевдоадиабатического) твердения. Метод адиабатического калориметра позволяет контролировать тепловыделение внутри газобетона без потерь тепла на его внешней поверхности. Свежеприготовленная газобетонная смесь с варьированным составом заливалась в специально подготовленные короба кубической формы. Эти короба изготавливались из фанерных листов толщиной 15 мм и утеплялись пенополистирольными листами толщиной 100 мм, с последующей герметизацией стыков для предотвращения утечек смеси. В соответствии с экспериментальным планом формы имели внутренние размеры ребер по 100 мм. Общий вид использованных форм и приборов для регистрации представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Формы для определения тепловыделения в газобетонных массивах

Регистрация температурных значений осуществлялась автоматически с использованием программируемого устройства Graphtec GL 400/350 MiDi Logger (Graphtec Corporation, Япония), которое позволяет фиксировать сигнал с заданным временным интервалом от термопар, преобразовывать и сохранять полученные данные. Программное обеспечение устройства обеспечивает обработку информации о изменениях температуры в массиве газобетона. Датчики термопар устанавливались в центре массива и на его поверхности, по два датчика на каждый массив.

2.1.2. Изучение свойств газобетонных смесей и газобетона

Газобетонная смесь для проведения эксперимента по определению температуры, образуемой в результате тепловыделения цемента в твердеющих

газобетонных смесях, приготавливалась в условиях лаборатории кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций и в лаборатории, и на технологических линиях предприятия ЗАО «АэроБел», ООО «Масикс». Составы газобетона определены с использованием разработанной программы расчета состава автоклавного газобетона (приложение А).

Нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста определяли с использованием прибора Вика в соответствии с ГОСТ 310.3-76 [180]. Цементное тесто готовилось вручную. Конус устанавливался на стеклянной поверхности, под которым размещался круг, размеченный концентрическими окружностями с интервалом 5 мм. С помощью регулируемых болтов, которые одновременно служили опорами прибора, круг со стеклом выравнивался в горизонтальном положении. Для определения растекаемости готовили 250 см³ газобетонной смеси, которую заливали в конус до верхнего кольца. Конус плавно поднимался вертикально, в результате чего газобетонная смесь растекалась по стеклу. С помощью концентрических окружностей в взаимно перпендикулярных направлениях определялись максимальный и минимальный диаметры образовавшегося расплыва, по которым вычислялся средний диаметр, характеризующий растекаемость газобетонной смеси.

Влажность смеси определяли по пунктам 4 и 5 ГОСТ 12730.2-2020 [181].

Модельные смеси для исследований **системы «Известь – Алюминий – Вода»** изготавливали из чистого свежесожженного оксида кальция, алюминиевой пасты (пудры) и дистиллированной воды. В стеклянный стакан вливали воду, одновременно всыпали отweighенное количество порошков CaO и Al, перемешивали в течении 20 с и помещали стакан со смесью в термоизолированную ячейку. Взаимодействие между компонентами системы сопровождалось выделением водорода и повышением температуры смеси. Через 10 мин, 1, 2, 6 и 24 ч отбирали пробы для анализов.

Модельная смесь системы **«Известь – Алюминий – Цемент – Вода»**, отражающая начальные этапы твердения вяжущих в технологии ударного формирования массива, готовилась из прокаленного оксида кальция, дисперсного алюминия, портландцемента и воды. В качестве цементного вяжущего

использовался ЦЕМ I 42,5 Н Белгородского цементного завода. Мольное соотношение CaO к Al составляло 5:1, при этом массовые количества извести и цемента были одинаковыми.

Модельная смесь системы «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода», характеризующая начальные процессы гидратации в литьевой технологии автоклавного газобетона с добавлением двухводного гипса или других форм сульфата кальция, изготавливалась аналогично вышеописанному процессу. Чистый $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ вводился в количестве, соответствующем мольному соотношению CaO:CSH₂, равному 5:1,5.

2.1.3. Методика определения физико-механических и теплотехнических характеристик

Основные физико-механические характеристики газобетонных образцов определялись согласно ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия» [19]. Перед испытанием производилось определение геометрических размеров образцов с точностью до 1 мм.

Плотность газобетонной смеси определяли в мерных цилиндрах емкостью от 250 до 2000 мл. Чистый и сухой цилиндр взвешивался на технических весах с точностью до 0,01 г. Газобетонную смесь заливали в цилиндр. Цилиндр взвешивается на технических весах с точностью до 0,01 г. Плотность газобетонной смеси вычисляли по формуле:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (2.1)$$

где m_1 – масса пустого цилиндра, кг; m_2 – масса цилиндра с газобетонной смесью, кг; V – объем цилиндра, дм³.

Среднюю плотность газобетонных образцов определяли в соответствии с ГОСТ 12852.0-2020 «Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний» [182] и ГОСТ 27005-86 «Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности» [183].

Использовались заранее высушенные образцы при температуре 105 ± 5 °С, размером $[(100 \times 100 \times 100) \pm 1]$ мм. Отобранные для испытания образцы взвешивались с погрешностью не более 0,5 %. Затем измерялись размеры образца

(длина, ширина, толщина) и вычислялся его объем. По полученным данным рассчитывали среднюю плотность газобетона.

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

$$\gamma_{\text{вл}} = \frac{m_{\text{в}}}{V}, \quad (2.2)$$

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

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

$$\gamma_{\text{сух}} = \frac{\gamma_{\text{вл}}}{(1+0,01W)}, \quad (2.3)$$

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



Рисунок 2.3 – Общий вид машин МИФ – 600.1.2.С

Предел прочности при сжатии определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [184] на испытательной машине МИФ – 600.1.2.С (рисунок 2.3).

Образцы газобетона выпиливали из газобетонных массивов из поверхности, центра и нижней части. В испытаниях использовали серии

из трех образцов размером $100 \times 100 \times 100$ мм.

Предел прочности при сжатии, МПа, определяли по формуле:

$$R_{\text{сж}} = \frac{\alpha k F}{S}, \quad (2.4)$$

где α – масштабный коэффициент; k – поправочный коэффициент, учитывающий влажность газобетона в момент испытаний; F – разрушающая нагрузка, Н; S – площадь рабочего сечения образца, мм^2 .

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 [184], для ячеистого бетона средней плотностью 400 кг/м^3 и более α для выпиленных образцов $100 \times 100 \times 100$ мм

принимается равным 0,95. Поправочный коэффициент, учитывающий влажность ячеистого бетона в момент испытаний принимается равным 1,0, как для ячеистого бетона с влажностью 10 % по массе.

Призмennую прочность определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 24452-2023 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» [185].

Водопоглощение определялось по методике ГОСТ 12730.3-2020 [186]. Образцы помещают в емкость, наполненную водой по ГОСТ 23732 [187], с таким расчетом, чтобы уровень воды в емкости был выше верхнего уровня уложенных образцов примерно на 50 мм. Образцы укладывают на прокладки таким образом, чтобы высота образца была минимальной (призмы и цилиндры укладывают на бок). Температура воды в емкости должна быть (20 ± 2) °С.

Образцы взвешивают через каждые 24 ч водопоглощения на обычных или гидростатических весах с погрешностью не более 0,1 %. При взвешивании на обычных весах образцы, вынутые из воды, предварительно вытирают отжатой влажной тканью. Массу воды, вытекшую из пор образца на чашку весов, следует включать в массу насыщенного образца.

Испытание проводят до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1 %.

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

$$W_M = \frac{m_c - m_b}{m_c} \times 100, \quad (2.5)$$

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

Водопоглощение от капиллярного воздействия определялось по DIN EN 772-11 [188] на призматических балках размерами 40×40×160 мм различных строительных материалов.

Для определения точных геометрических размеров и массы после охлаждения все образцы были измерены с помощью штангенциркуля и взвешены на весах, прошедших поверку по метрологическим требованиям.

Подготовленные для испытаний образцы 40×40×160 мм помещались на сетку, расположенной на дне емкости с постоянным уровнем воды 20 мм, и начинался отсчет времени по секундомеру. По истечении 10 мин образцы извлекались из емкости, поверхность вытиралась сухой тряпкой, измерялась высота поглощения воды в образцах, их масса, после чего образцы помещались обратно в воду. Такую же последовательность выполняли спустя 30 и 90 мин.

После определения массы влажных образцов был рассчитан коэффициент водопоглощения от капиллярного воздействия. Коэффициент водопоглощения показывает скорость впитывания влаги образцом за определенный промежуток времени.

Коэффициент водопоглощения материалов за счет капиллярного воздействия рассчитывали по формуле, округляя до $1 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0.5})$:

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{so}}} \times 10^6 \quad (2.6)$$

где $m_{dry,s}$ – масса высушенного испытуемого образца, г; $m_{so,s}$ – масса испытуемого образца после погружения в течение периода t , г; A_s – площадь поперечного сечения, погруженного в воду, мм^2 ; t_{so} – время погружения, с;

Морозостойкость газобетона определялась в соответствии с ГОСТ 31359 [20]. Для испытаний на морозостойкость были отобраны по 24 образца-куба размером 100×100×100 мм из каждой серии. Насыщение образцов осуществлялось путем погружения в воду на 1/3 их высоты с предотвращением всплытия, после чего образцы выдерживались в воде в течение 8 ч; затем их погружали на 2/3 высоты и также выдерживали 8 ч, а затем полностью погружали в воду на 24 ч.

Подготовленные основные образцы, предназначенные для определения потери прочности и массы после циклов замораживания и оттаивания, взвешивались и помещались в морозильную камеру при температуре $-18 \text{ }^\circ\text{C}$. Продолжительность одного цикла замораживания при установленной температуре в камере составляла 4 ч, после чего образцы извлекались и помещались в камеру для оттаивания с комнатной температурой и относительной влажностью 90 % на 18 ч. После каждого пятого цикла переменного замораживания и оттаивания при

температуре $\pm(18\pm 2)$ °С проводился осмотр образцов-кубов, и они испытывались на сжатие. Если относительное снижение прочности на сжатие газобетона после определенного числа циклов не превышало 15 %, а относительная потеря массы – 5 %, то марка бетона данной серии соответствовала установленным требованиям.

Коэффициент **паропроницаемости** газобетона определяли по ГОСТ 25898-2020 [189] на образцах газобетона размерами 100×100×30 мм, выпиленных из газобетонного массива.

Определение **усадки** образцов газобетона проводилось по ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия» [19] при высыхании образцов в течение длительного времени в естественных условиях, что позволяет более полно представить сложную динамику изменений усадочных деформаций ячеистого бетона в условиях, приближенным к реальным.

Усадочные деформации газобетона определялись испытанием трех образцов-призм размером 40×40×160 мм. Образцы выпиливали из контрольного ячеистобетонного блока размерами в соответствии с требованиями ГОСТ 25485-2019 [19], не позднее чем через 24 ч после автоклавной обработки. До испытания образцы хранились в закрытых эксикаторах над водой.



Рисунок 2.4 – Прибор для измерения теплопроводности ИТП-МГ4 «100»

Теплопроводность определялась с использованием измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 «100» (рисунок 2.4), который работает в соответствии с ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Принцип работы прибора основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец

заданной толщины и направленного перпендикулярно к его лицевым граням, с последующим измерением толщины образца, плотности теплового потока и температуры противоположных граней.

Испытания проводились в следующем порядке. Для обеспечения точности результатов было изготовлено три образца в форме прямоугольных параллелепипедов, у которых большие (лицевые) грани представляют собой квадраты со стороной 100×100 мм (для прибора ИТП-МГ4 «100»). Толщина образцов варьировалась от 3 до 28 мм. Длина и ширина образцов измерялись линейкой с погрешностью не более 0,5 мм. Толщина образца H и разница температур между нагревателем и холодильником ΔT выбирались в соответствии с рекомендациями приложения к руководству по эксплуатации прибора, исходя из предполагаемой теплопроводности материала.

Определение размеров пор воздухововлечения с учетом характера радиусов кривизны осуществлялось по авторскому способу определения пористости ячеистых бетонов, реализованному на кафедре строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова (приложение Б) [191].

2.2. Характеристика применяемых материалов

В качестве сырьевых компонентов в работе использовались портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «Себряковский цементный завод», портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Белгородский цементный завод», портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Осколцемент», портландцемент ЦЕМ I 42,5Н завода «Пролетарий» ОАО «Новоросцемент», соответствующих ГОСТ 30515-2013 [192] и ГОСТ 31108-2020 [193]; песок Корочанского месторождения, соответствующий ГОСТ 8736-2014 [194]; известь негашеная комовая производства ОАО «ОЭМК» и ООО «Придонхимстрой Известь», г. Россошь, Воронежской обл., соответствующих ГОСТ 9179-2018 [195]; гипс ОАО «Гипсобетон» г. Видное, Московская область, соответствующий ГОСТ 125-2018 [196] и ГОСТ 4013-2019 [197]; алюминиевая пудра, соответствующая ГОСТ 5494-2022 [198] и алюминиевая паста STAPA Alupor производства ООО «Eckart» (Германия); вода, соответствующая ГОСТ 23732-2011 [187]. Все материалы удовлетворяют требованиям соответствующих нормативных документов.

Химический состав портландцементов приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав портландцемента

ПЦ	Содержание, %								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	п.п.п.	прочее
Себряковцемент	62,44	21,29	5,72	3,37	2,09	2,83	1,21	1,1	1,05
Белгородский цемент	64,72	22,49	4,77	4,40	0,43	2,04	0,20	1,5	0,95
Старооскольский	65,84	21,48	5,31	4,25	0,90	0,26	0,65	1,4	1,31
Новороссийский	64,82	20,98	4,34	4,15	0,82	3,03	0,84	1,1	1,02

Минеральный состав и технические параметры портландцемента приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Минеральный состав и технические параметры портландцемента

Наименование показателя	Значение показателя			
	Себряков-цемент	Белгородский цемент	Старооскольский цемент	Новороссийский цемент
Минералогический состав клинкера, мас. %				
C ₃ S	62	61	68	65
C ₂ S	12	17	10	12
C ₃ A	9	5	8	4
C ₄ AF	12	12	12	13
Тонкость помола: остаток на сите №008, мас. %	10	10	10	4,7
удельная поверхность, м ² /кг	300-340	290-330	296	338
Нормальная густота цементного теста, %	26,2	25	28	24,5
Сроки схватывания				
начало, мин	100-140	150	146	160
конец, мин	180-200	210	244	220
Активность при пропаривании, МПа	37,2	34,2	51,5	51,2

Применявшийся цемент полностью соответствует предъявляемым к нему требованиям.

При этом необходимо выделить, что этот цемент демонстрирует большой порог прочности при сжатии в возрасте 28 сут, существенно превосходящий необходимый уровень.

Используемый кварцевый песок Корочанского месторождения Белгородской области (таблицы 2.3-2.5) соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» [194]. Насыпная плотность песка составляет 1440 кг/м³, модуль крупности равен 0,98 (таблица 2.4). По классификации ГОСТ 8736–2014 песок относится к категории тонких II класса.

Таблица 2.3 – Свойства кварцевого песка Корочанского месторождения

Показатель	Значение
Модуль крупности	0,98
Насыпная плотность, кг/м ³	1420-1440
Содержание глинистых и пылевидных частиц, %	0,7

Таблица 2.4 – Химический состав кварцевого песка Корочанского месторождения

Оксиды	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	п.п.п.
Содержание, %	92,65	4,18	0,6	1,69	0,69	0,19	1,23

Таблица 2.5 – Гранулометрический состав кварцевого песка Корочанского месторождения

Размер сит, мм	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	Модуль крупности
Частные остатки, %	0,05	0,03	0,01	0,6	10,35	75,7	13,26	0,98

Свойства извести негашеной комовой представлены в таблицах 2.6 и 2.7.

Таблица 2.6 – Свойства негашеной комовой извести ОАО «ОЭМК»

Показатель	Значение
Содержание активного СаО, %	80
Активная MgO, не более, %	5
Непогасившиеся зерна, не более, %	11
Время гашения, мин	8

Таблица 2.7 – Свойства извести негашеной комовой ООО «Придонхимстрой Известь» г. Россошь, Воронежской обл.

Показатель	Значение
Содержание активного СаО+MgO (%), %	84,5
Активная MgO, не более, %	0,8
Остаток на сите 02/008 (%)	0,62/9,8
Время гашения, мин	3

Для регулирования структурообразования, нарастания пластической прочности, ускорения твердения газобетона используют гипс по ГОСТ 125-2018 [196] или гипсовый камень по ГОСТ 4013-2019 [197].

Регулятором времени гашения и схватывания массивов являлся гипс строительный Г-5А II, начало и конец схватывания которого, соответственно, 8 и 13 мин, остаток на сите №02 – 4,4 %. Свойства гипса представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Свойства гипса

Показатель	Значение
Марка	Г-5А II
Водогипсовое отношение, %	56
Прочность при сжатии через 2 ч, МПа	5,5
Прочность при изгибе через 2 ч, МПа	2,7
Тонкость помола (остаток на сите 02), %	6

В качестве газообразователя для изготовления газобетона используется алюминиевая паста СТАРА Alupor и пудра алюминиевая ПАП-1. Алюминиевая паста вводится в систему в виде водной суспензии (рисунок 2.5). Спецификация на алюминиевую пасту СТАРА Alupor приведены в таблице 2.9.

Пудра алюминиевая ПАП-1 – представляет собой тонкоизмельченный

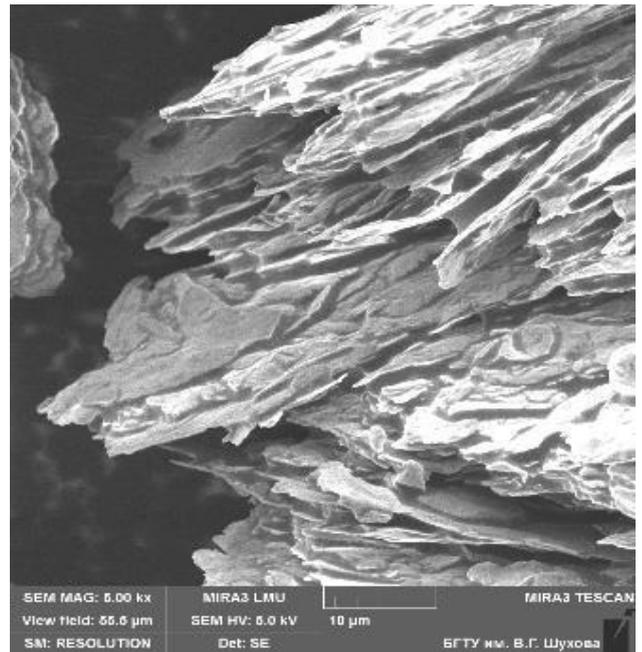


Рисунок 2.5 – Агрегаты алюминиевой пасты

продукт по ГОСТ 5494-95 [198], имеющий частицы пластинчатой формы серебристо-белого цвета без посторонних примесей, который изготавливается из сырья не ниже марки А5. Пудра марки ПАП-1 изготавливается методом измельчения в шаровых мельницах первичного алюминия. В процессе изготовления в состав также добавляются дополнительные ингредиенты в виде

стеарина, которые исключают слипание частиц и окисления. Характеристика алюминиевой пудры ПАП-1 приведена в таблице 2.10.

Таблица 2.9 – Свойства алюминиевой пасты STARA Alupor

Показатель	Нормативное значение	Фактическое значение
Смешиваемость с водой	смешивается	смешивается
Остаток на сите 45 мкм, %, не более	20	19,65
Размер частиц D ₅₀ , мкм	35(типично)	30,01
Массовая доля нелетучих веществ, %	70±2	71,2
Содержание активного алюминия, %, не менее	90	91,78
Газовыделение при 25 °С через 10 мин, мл, не менее	60	67
Газовыделение при 25 °С через 16 мин, мл, не менее	70	73

Таблица 2.10 – Характеристика алюминиевой пудры ПАП-1

Наименование показателей	ПАП-1 по ГОСТ 5494-95
Массовая доля основного вещества Al, не менее	91,5%
Массовая доля Fe, не более	0,5%
Массовая доля Si, не более	0,4%
Массовая доля Cu, не более	0,05%
Массовая доля Mn, не более	0,01%
Влажность, не более	0,03%
Жировые добавки	2,0%
Предельно полевая влагоемкость (ППВ)	8200 см ² /г
Гранулометрический состав	менее 80 мкм
Всплываемость	80%

Содержание активного алюминия пудры ПАП-1 и пасты STARA Alupor определялось рентгенофазовым анализом (рисунок 2.6). Алюминиевая паста имеет большую интенсивность отражений Al (2,344 и 2,027Å), следовательно, содержит больше активного алюминия по сравнению с алюминиевой пудрой.

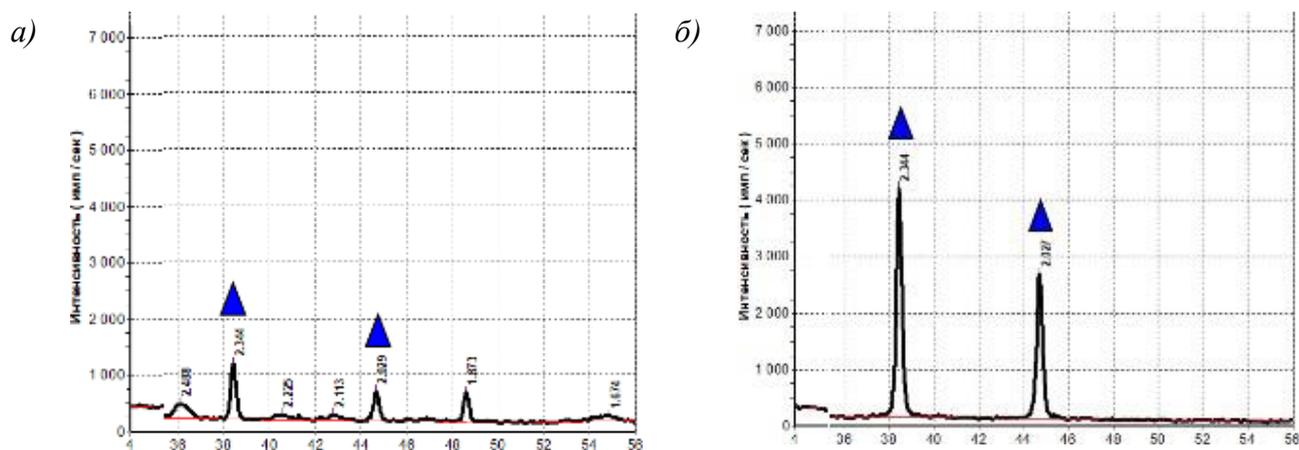


Рисунок 2.6 – Рентгенограммы алюминиевой пудры ПАИ-1 (а) и алюминиевой пасты STAPA Alupor (б): ▲алюминий Al

При использовании алюминиевой пасты процесс поризации протекает более стабильно, что позволяет формироваться матрице массива и его структуре, характеризующейся мелкой пористостью, однородностью и отсутствием расслоений.

Газообразующая способность газообразователя также зависит от его гранулометрического состава. Размерное распределение частиц алюминиевой пудры и пасты определялось в соответствии с ГОСТ 5494-2022 [198] и представлено на рисунке 2.7.

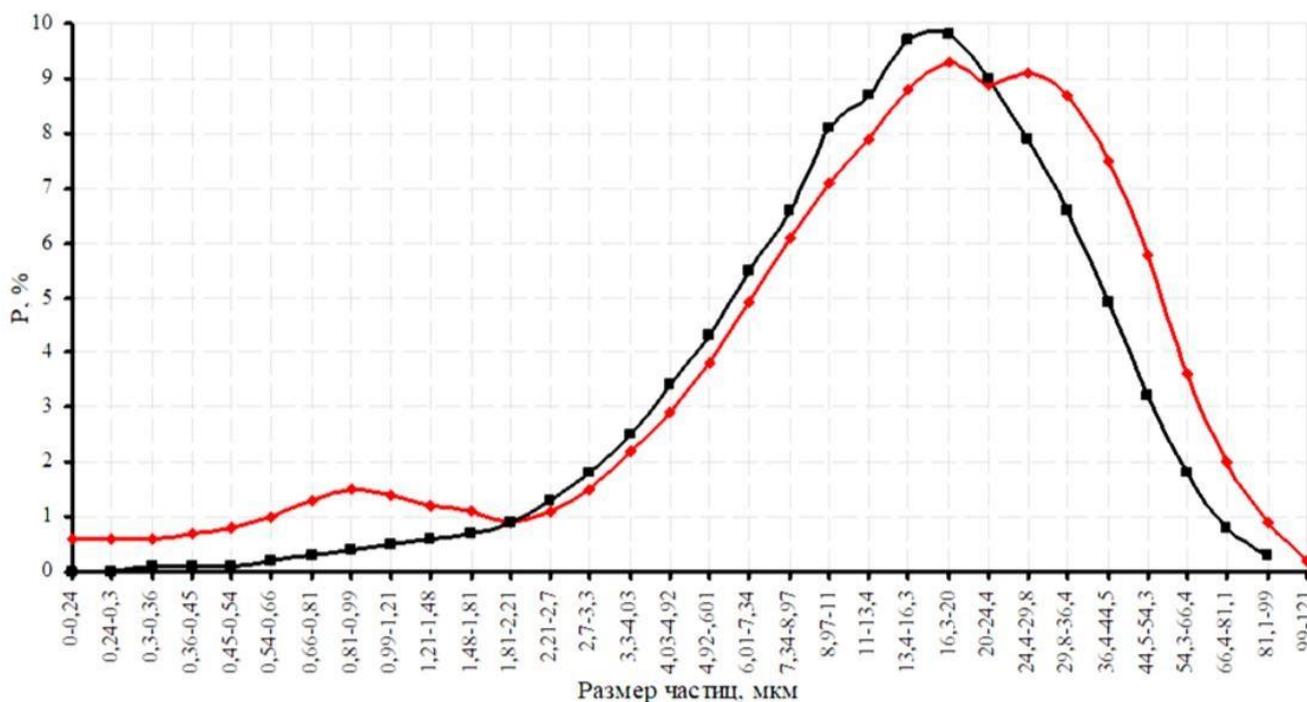


Рисунок 2.7 – Распределение частиц газообразователя по размерам:

—♦— — алюминиевая паста STAPA Alupor; —■— — алюминиевая пудра ПАИ-1

Согласно рисунку 2.7, алюминиевая пудра ПАП-1 демонстрирует одномодальное распределение частиц с четко выраженным пиком в диапазоне 3,3-54,3 мкм, в то время как алюминиевая паста STARA Alupor имеет полидисперсный состав с отчетливыми пиками в диапазонах 0,54-1,81 мкм и 3,3-54,3 мкм. Гранулометрический состав пасты STARA Alupor позволяет регулировать кинетику газовыделения, что способствует стабильному протеканию процесса и формированию массива с ровной поверхностью без завалов и кратеров.

Также была исследована зависимость физико-механических свойств газобетона от гранулометрического состава газообразователя. Прочность на сжатие газобетона, изготовленного с использованием алюминиевой пасты STARA Alupor, на 30 % превышает прочность газобетона, полученного с применением алюминиевой пудры.

Применение алюминиевой пасты STARA Alupor является наиболее целесообразным. Благодаря лучшей кинетике газовыделения, оптимальному гранулометрическому составу, высокому содержанию активного алюминия, а также улучшенной гомогенизации алюминиевой суспензии и минимальным временным затратам на приготовление, достигается высокая стабильность процессов формования и предсказуемость параметров газобетонной смеси. Это, в свою очередь, позволяет улучшить качество поровой структуры газобетона и его эксплуатационные характеристики.

Вода для затворения бетона должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732–2011 [187]. Окисленность воды не может быть больше 15 мг/л. Количество органических поверхностно-действующих веществ, сахаров и фенолов, содержащихся в воде не должно быть больше 10 мг/л. Показатель pH не должен быть меньше 4 и более 12,5. Содержание в воде растворимых солей ионов SO_4^{2-} не более 2700 мг/л, Cl^{-1} не более 1200 мг/л, растворимых солей не более 5000 мг/л.

Таким образом, в исследованиях применялись современные методы исследования, обеспечивающие достоверность полученных результатов. Использовались традиционные материалы, имеющие широкое распространение и производство в промышленности строительных материалов, и соответствовали требованиям существующих нормативных документов по химическому и минералогическому составу.

2.3. Выводы

1. Для изучения и анализа сырьевых компонентов и газобетонов на их основе применялись стандартные методики и требования нормативных документов, включая современные физико-химические методы анализа: рентгенофазовый, растровой электронной и оптической микроскопии и др.

2. В исследованиях применялись современные методы исследования, обеспечивающие достоверность полученных результатов. Использовались традиционные материалы, имеющие широкое распространение и производство в промышленности строительных материалов, и соответствовали требованиям существующих нормативных документов.

3. Определение размеров пор воздухововлечения с учетом характера радиусов кривизны осуществлялось по авторскому способу определения пористости ячеистых бетонов, реализованному на кафедре строительного материаловедения, изделий и конструкций БГТУ им. В.Г. Шухова

3. ТВЕРДЕНИЕ ГАЗОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Формирование пористой структуры в газобетонной смеси является наиболее ответственным технологическим процессом при изготовлении газобетонных изделий. Химизм и механизм газообразования, реакций гидратации извести и цемента в процессе формирования пористой структуры окончательно не выяснены. Отсутствуют данные о взаимосвязи параметров экзотермических процессов и принципов управления тепловой самообработкой в газобетонной смеси с учетом энергетического потенциала ингредиентов и других, значимых для технологии факторов.

3.1. Процессы гидратообразования в газобетонной смеси

Развитие представлений о физико-химических закономерностях процессов, протекающих при производстве автоклавного ячеистого бетона позволит создавать технологические решения по совершенствованию производства. Наиболее значимым для технологии ячеистого бетона является процесс формирования пористой структуры на начальном этапе твердения вяжущих, а также участие в гидратообразовании продуктов взаимодействия алюминия с ингредиентами сырьевой смеси.

Состав сырьевой смеси большинства заводов автоклавного ячеистого бетона включает известь, портландцемент, кварцевый песок, двуводный гипс, алюминиевый газообразователь, воду и обратный шлам. В гидратообразовании при формировании массива до его автоклавирования участвуют дисперсный алюминий (Al), известь (CaO), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), цемент и вода. Кремнезем не вступает в реакции гидратообразования при формировании пористой структуры ячеистого бетона. Роль SiO_2 заключается в синтезе гидросиликатов кальция в процессе автоклавирования. Формализация гидратообразования осуществлена на модельных смесях, а также с применением компонентов, практически используемых на заводах автоклавного ячеистого бетона [199].

3.1.1. Система «Известь – Алюминий – Вода»

Система «Известь – Алюминий – Вода» представляет собой концептуальную модель, описывающую фазовые состояния, возникающие в процессе гидратации оксида в образовании алюминиевой пудры или пасты. Важным фактором данной модели является участие трехкальцевого алюмината клинкера в образовании гидратных фаз. Экспериментальные исследования проводятся в термоизолированной ячейке, что обеспечивает стабильные условия для контроля температурных изменений. Для проведения экспериментов были подготовлены смеси, состоящие из свежесожженного оксида, находящегося в порошкообразной форме и дистиллированной воды. Результаты рентгенографического анализа представлены на рисунке 3.1.

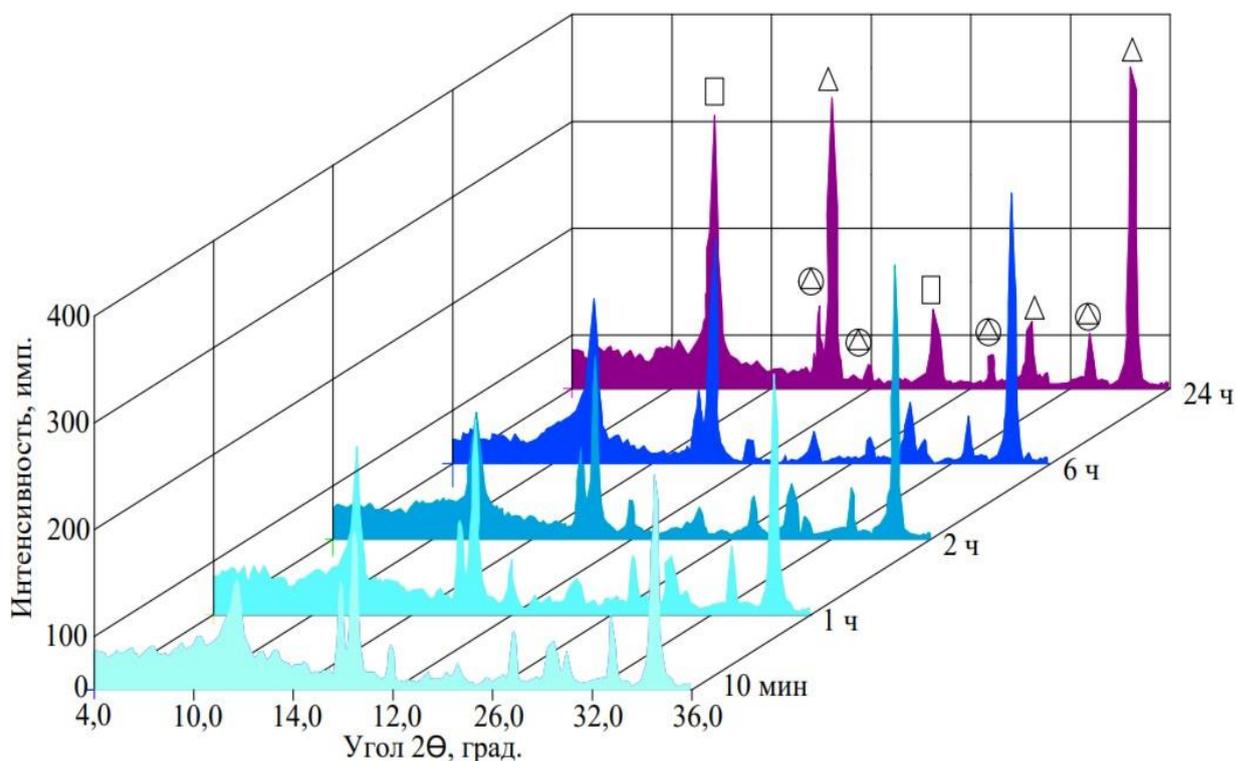


Рисунок 3.1– Рентгенограммы продуктов гидратации извести с алюминием при мольном соотношении CaO к Al 5:1: Δ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; \square – C_3AH_6 ; \odot – Am-фаза

Анализ препаратов проводился через 10 мин, 1, 2, 6 и 24 ч после начала состояния. Полученные данные проявления, которые в спектре образца наблюдаются через 10 мин, исключают характерные отражения исходного CaO с случайными пиками при $d = 2,413 \text{ \AA}$ и $2,785 \text{ \AA}$, а также для наблюдения с $d = 2,347 \text{ \AA}$ и $2,032 \text{ \AA}$. Это

свидетельствует о том, что процесс гидратации протекает активно, и реакция с алюминием завершена. В результате гидратообразования формируются такие продукты, как гидроксид $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с пиками $d = 2,629; 4928$ и 1927 \AA ; кубический гидроалюминат C_3AH_6 с пиками $d = 5,140; 4,461; 3,363; 3,148; 2,814 \text{ \AA}$ и гексагональная Am-фаза с основным отражением $d = 7,628 \text{ \AA}$.

В соответствии с диаграммой состояния системы «Известь – Алюминий – Вода» при мольном соотношении $\text{CaO} : \text{Al}_2\text{O}_3$ больше 4:1 при повышенной температуре (от 363 К) стабильной ассоциацией гидратных фаз является $\text{C}_3\text{AH}_6 + \text{CH}$. Ниже 363 К и избытке извести стабильна ассоциация C_4AH_{13} с CH . Полученные данные соответствуют фазовым равновесиям в рассматриваемой системе.

Первоначально образовавшийся кубический гидроалюминат C_3AH_6 в ассоциации с CH за счет охлаждения смеси к 24 ч эксперимента начинает преобразовываться в $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ (гексагональную Am-фазу).

Когда температура не снижается, стабильные продукты гидратообразования при взаимодействии извести, алюминия и воды, представлены гидроксидом кальция и шестиводным гидроалюминатом кальция.

3.1.2. Система «Известь – Алюминий – Цемент – Вода»

Исследования проводились на смесях, состоящих из прокаленного оксида кальция, дисперсного алюминия, портландцемента и воды. Мольное соотношение $\text{CaO} : \text{Al}$ было установлено на уровне 5:1, при этом массовые количества извести и цемента были равными.

В данной системе происходит кристаллические фазы портландита с параметрами $d = 2,633 \text{ \AA}$ и $4,941 \text{ \AA}$, а также Am-фаза с отражениями $d = 8,268 \text{ \AA}$ и кубический шестиводный гидроалюминат с характерными рентгенографическими отражениями. Исходные компоненты — оксидные образования и алюминий — не были обнаружены в конечных продуктах, что свидетельствует об их активном вращении с другими элементами и превращении в кальциевые гидраты.

Рентгенографические отражения клинкерных минералов в аспекте угла 2θ 32-33° свидетельствуют о низкой степени гидратации этих минералов. Процесс гидратообразования в течение 28 сут сопровождается прогрессирующей гидратацией клинкерных минералов и трансформацией C_3AH_6 в другие виды алюминатных гидратов, обычно в AFm-фазах с случайными проявлениями в области углов 2θ 10-12°.

Гексагональные гидратные фазы обладают переменным составом с изоморфизмом в основном положении, обусловленным заменой ионов Al^{3+} на Fe^{3+} , возникающих из системы C_4AF клинкера. Кристаллическая структура гексагональных кальциевых гидратов (AFm-фаза) представлена возможными эмпирическими слоями $[Ca_2(M(OH)_6) + 2H_2O]$, где M – это Al^{3+} или Fe^{3+} . Межслоевое пространство содержит анионы OH^- и молекулы воды. Гетеровалентный изоморфизм между анионами OH^- , SO_4^{2-} и CO_3^{2-} приводят к образованию твердого раствора состава $C_3(A,F)(CH,Cs,C_1)H_{12}$.

Благодаря наличию гипса в портландцементе и высокой температуре начальной стадии сульфатосодержащая Am-фаза с $d = 8,268 \text{ \AA}$, аналогичная моносульфогидроалюминату. Взаимодействуя с C_3AH_6 и производя гидратации C_3A и C_4AF , сульфатосодержащий гидрат преобразуется в AFm-фазу, аналогом которой является гексагональный C_4AH_{13} .

Гидратация приводит к образованию гидроксидных эффектов с направлением распространения отражений плоскости (101) с $d = 2,663 \text{ \AA}$ к частоте пика (001) с $d = 4,941 \text{ \AA}$ при равенстве 10:7. Это соотношение интенсивности характерно для структуры портландита.

При гидратации портландцемента происходит образование гидроксида с измененными кристаллографическими функциональными (рисунок 3.2).

Благодаря направленному росту кристаллов и образованию органических растворов наблюдается преобладание рентгеновского пика с $d = 4,9 \text{ \AA}$ по сравнению с пиком при $d = 2,63 \text{ \AA}$.

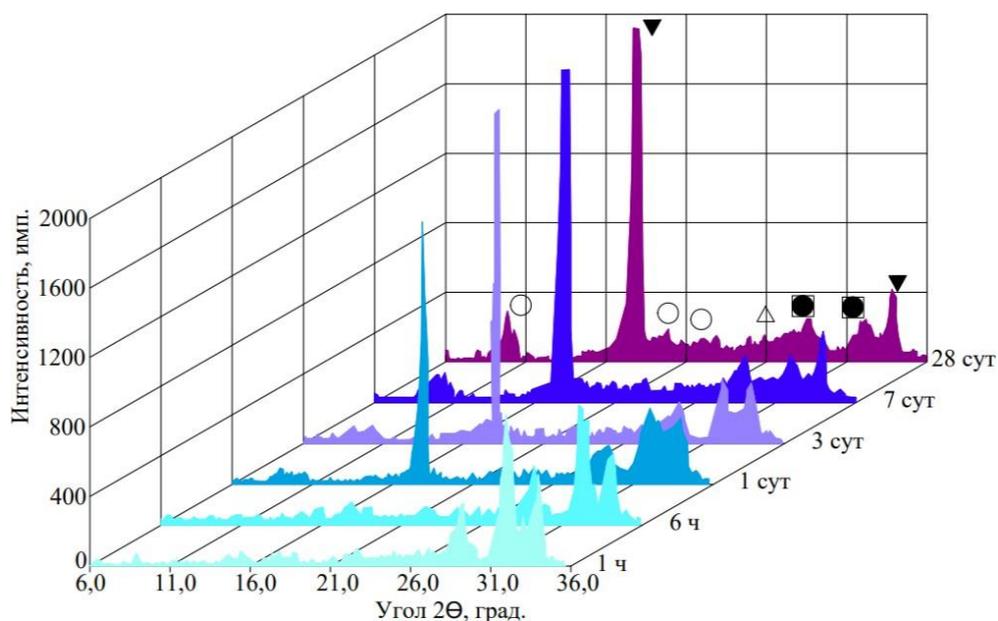


Рисунок 3.2 – Рентгенограммы продуктов гидратации известково–цементного вяжущего с добавкой Al: ▼ – C_3S ; △ – $Ca(OH)_2$; ■ – $CSH(B)$; ○ – AFm-фаза

Пластинчатая кристаллизация гидроксида образования ($Ca(OH)_2$) может быть учтена в технологии автоклавного ячеистого бетона, особенно на ранних стадиях гидратации, когда образуется пористая структура данного материала.

3.1.3. Система «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода»

Рассматриваемая система представляет собой модель, характеризующую процессы гидратообразования в технологии автоклавного ячеистого бетона с добавлением двуводного или полуводного гипса. Гипс марки Г-4 вводился в количестве, соответствующему мольному соотношению $CaO : CSH_2$, равному 5:1,5. Спектры продуктов гидратации в гипсосодержащей системе представлены на рисунке 3.3.

Введение $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ приводит к образованию моногидратов и значительному уменьшению количества формируемого C_3AH_6 на начальном этапе гидратообразования. Гипс, обладающий основным излучением $d = 2,776 \text{ \AA}$, изначально является одним из символов кристаллических фаз данной системы. Спустя один час наблюдаются последствия снижения содержания $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, при этом наиболее интенсивные отражения в спектре соответствуют гидроксиду преобразования. Соотношение частоты пиков гидроксида с $d = 2,63 \text{ \AA}$ и $4,9 \text{ \AA}$ составляет соответственно 10 и 7.

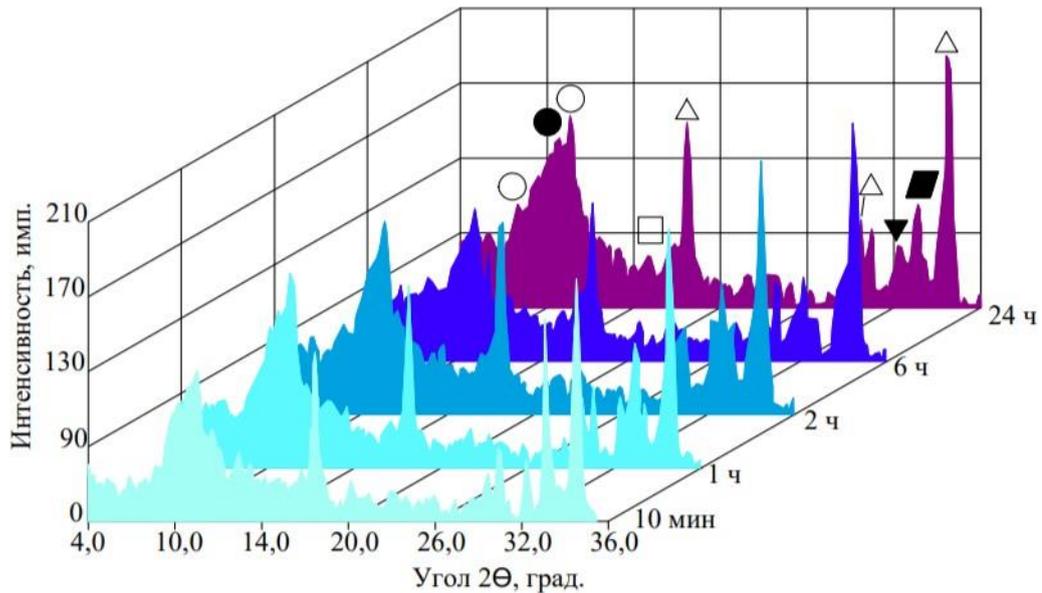


Рисунок 3.3 – Рентгенограммы продуктов гидратации известково-цементного вяжущего с добавками Al и гипса: \triangle – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; \square – C_3AH_6 ; \circ – AFm-фаза; \blacktriangledown – C_3S ; \bullet – AFt-фаза; \blacksquare – C_5H_2

Существенные изменения в дифракционных спектрах фиксируются в области углов 2θ 8-12°, где расположены основные пики гексагональных AFm-фаз и этtringитоподобной AFt-фазы. В этой области угла происходит наложение отражений как минимум четырех гидратных фаз, которые представляют собой твердые растворы. Введение гипса в систему обеспечивает формирование AFt-фазы с $d = 9,77 \text{ \AA}$, аналогом которой является этtringит. Таким образом, взаимодействие компонентов системы «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода» оказывает влияние на процессы гидратообразования и обеспечивает различные кристаллические фазы, что обеспечивает сохранение свойств автоклавного ячеистого бетона.

Полученные данные о гидратообразовании в модельных газобетонных смесях на ранних этапах формирования структуры автоклавного ячеистого бетона позволяют формализовать химические реакции. Это дает возможность оценить теплофизические характеристики газобетонных смесей.

3.2. Теплофизические характеристики газобетонных смесей

Энергетический потенциал (тепловыделение) газобетонной смеси определяется преимущественно составом смеси [200]. На каждом отдельно взятом современном заводе автоклавного газобетона в процессе производства изделий

изменяются характеристики сырья, корректируется состав смеси и варьируются технологические параметры. Объективно меняющиеся параметры требуют оперативного управления технологическим процессом. Анализ технологии производства и используемых рецептов на ряде предприятий таких, как ЗАО «АэроБел» (г. Белгород, Россия), ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия), ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия), ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь) и других предопределил назначение номинальных составов. Также составы определены с использованием разработанной программы расчета состава автоклавного газобетона (приложение А). Номинальные составы газобетонных смесей приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Составы газобетонных смесей

Наименование компонентов	Ед. изм.	Количество для марки по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Известь	кг	15	25	35	45	50	55
Цемент	кг	45	85	90	100	95	90
Песок	кг	35	80	160	230	325	420
Гипс полуводный	кг	1	1,5	2	2	2,5	3
Алюминиевая паста	кг	1,01	0,91	0,83	0,77	0,71	0,64
Вода	л	80	130	170	190	210	230
Твердая фаза*	кг	95	190	285	375	470	565
Газовая фаза**	л	885	800	720	670	615	555

Примечание: * – без учета пасты; ** – во вспученном массиве.

Номинальные составы отражают реальное количество компонентов в смеси для производимых изделий с марками по средней плотности D400, D500 и D600, а также тенденцию продвижения по составам при изготовлении газобетона с маркой до D100. Основные компоненты в смеси представлены известью, цементом, песком и водой. Гипс и алюминиевый газообразователь из-за малого количества не учитывали. Для строительной извести активность равна 85 %. Содержание алюминия в пасте газообразователя составляет 75 %.

Реальный вид и состав материалов, используемых при приготовлении газобетонных смесей в производственных условиях, зависит от принятой заводом технологии. Так на заводе ЗАО «АэроБел» (г. Белгород, Россия) в смеситель

дозировать песчаный шлам, получаемый мокрым помолом песка с водой. Далее дозируют обратный шлам, получаемый распульпацией обрезков, который по основному веществу можно принять в качестве кварцевого компонента. На смешение в сухом виде подают цемент и известково-кремнеземистое вяжущее. Количество последнего определяет активность смеси по оксиду кальция. Температуру смеси регулируют соотношением подаваемой на замес горячей и холодной воды. За 1 мин до завершения перемешивания в смеситель дозируют алюминиевую суспензию. Вода является наиболее энергоемким компонентом в газобетонной смеси. На ее долю приходится от 69,2 до 81,6 % энергии, необходимой для нагрева смеси, что указывает на преимущество ударной технологии в энергетическом плане. В ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия) используют порошкообразную известь. Двухводный гипс вводится при приготовлении песчаного шлама. Однако по номинальному составу смеси в ООО «ЛСР. Стеновые» соответствуют составу смеси в ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия). Показатели состава номинальных газобетонных смесей приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Показатели состава газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		D100	D200	D300	D400	D500	D600
Активность	%	13,42	11,18	10,44	10,20	9,04	8,27
Содержание СаО	кг/м ³	10,84	18,06	25,29	32,51	36,13	39,74
Содержание активного алюминия	кг/м ³	0,76	0,68	0,62	0,58	0,53	0,48
Водотвердое отношение, В/Т	–	0,84	0,68	0,60	0,51	0,45	0,41

Теплоемкость газобетонных смесей после приготовления определяли по правилу аддитивности, исходя из массового содержания компонентов в смеси, по формуле:

$$c = \frac{c_u m_u + c_c m_c + c_n m_n + c_v m_v}{m_u + m_c + m_n + m_v} \quad (3.1)$$

где c_u, c_c, c_n, c_v – удельные теплоемкости соответственно извести, цемента, кварцевого песка и воды, Дж/(кг·°С); m_u, m_c, m_n, m_v – массовое содержание извести, цемента, кварцевого песка и воды в 1 м³ газобетонной смеси, кг.

В таблице 3.3 приведены теплофизические характеристики компонентов газобетонной смеси.

Таблица 3.3 – Удельная теплоемкость и плотность компонентов газобетонной смеси

Компонент	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость при 25°C, C _p 298 Дж/(кг·°C)
CaCO ₃	2710	818,7
Ca(OH) ₂	2230	1181,5
CaO	3320	763,7
SiO ₂	2650	740,0
CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	2720	823,2
CaSO ₄ ·2H ₂ O	2320	1081,1
Цемент	3150	838,0
Al	2700	903,3
H ₂ O ж	997	4181,5
H ₂ O г**	0,023	1864,5
Воздух*	1,292	1005,0
H ₂ O г*	0,09	14282,7
Fe	7850	447,5

Примечание: * – при 0 °C; ** – при 100 °C.

Объемная доля газа в смеси от 50 до 90 %, при этом массовое количество незначительно и не влияет на теплоемкость газобетонной смеси.

Объемная теплоемкость газобетонных смесей и теплоемкость составляющих смесь компонентов приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Объемная теплоемкость газобетонных смесей

Наименование	Объемная теплоемкость, кДж/(кг·°C) для марки по средней плотности					
	D100	D200	D300	D400	D500	D600
Газобетонная смесь	409,7	693,3	930,7	1083,2	1236,8	1390,5
Вода смеси	<u>334,5</u> *81,6	<u>543,6</u> *78,4	<u>710,9</u> *76,4	<u>794,5</u> *73,3	<u>878,1</u> *71,0	<u>961,8</u> *69,2
Твердая фаза смеси	<u>75,2</u> 18,4	<u>149,7</u> 21,6	<u>219,8</u> 23,6	<u>288,7</u> 26,7	<u>358,7</u> 29,0	<u>428,7</u> 30,8
Известь	11,6	19,3	27,0	34,7	38,6	42,5
Цемент	37,7	71,2	75,4	83,8	79,6	75,4
Песок	25,9	59,2	118,4	170,2	240,5	310,8

Примечание: * – % в газобетонной смеси.

Значения удельных теплоемкостей, а также величины других характеристик газобетонных смесей для газобетонов с марками по средней плотности от $D100$ до $D600$ приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Характеристики газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		$D100$	$D200$	$D300$	$D400$	$D500$	$D600$
Средняя плотность	кг/м ³	175	320	455	565	680	795
Газовая пористость	%	88,5	80,0	72,0	67,0	61,5	55,5
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°С)	2341	2167	2046	1917	1819	1749
Теплопроводность	Вт/(м·°С)	0,25	0,30	0,33	0,36	0,39	0,42

Значения удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей связаны соотношением:

$$C^{об} = c \cdot \rho / 1000, \quad (3.2)$$

где c – удельная теплоемкость газобетонной смеси, кДж/(кг·°С), ρ – средняя плотность газобетонной смеси, кг/м³. Величины удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Величины удельной и объемной теплоемкостей газобетонных смесей

Показатель	Ед. изм.	Марка по средней плотности					
		$D100$	$D200$	$D300$	$D400$	$D500$	$D600$
Средняя плотность	кг/м ³	175	320	455	565	680	795
Удельная теплоемкость	Дж/(кг·°С)	2341	2167	2046	1917	1819	1749
Объемная теплоемкость	кДж/(л·°С)	409,7	693,3	930,7	1083,2	1236,8	1390,5

Полученные результаты по теплофизическим характеристикам газобетонных смесей позволяют дать оценку термического потенциала смесей за счет экзотермии реакций гидратообразования.

3.3. Термический потенциал газобетонных смесей

Исследования системы «Известь – Алюминий – Вода» согласуются с известными представлениями и свидетельствуют о том, что первой экзотермической реакцией в смеси автоклавного газобетона является

взаимодействие металлического алюминия и гидроксида кальция с образованием шестиводного гидроалюмината кальция и газообразного водорода:



В гидратирующихся системах теплоту гидратации приравнивают к изменению энтальпии реакции ΔH_0 в адиабатическом процессе. Энтальпия реакции (3.3) составляет $\Delta H_0 = -879,14$ кДж/моль или 16 280 кДж тепла на 1 кг активного алюминия в смеси.

Второй экзотермической реакцией является гидратация извести:



Энтальпия данной реакции равна $\Delta H_0 = -63,7$ кДж/моль или 1136 кДж на 1 кг активного CaO в газобетонной смеси.

Третьим процессом, определяющим энергетический потенциал газобетонных смесей, является тепловыделение за счет гидратации цемента. На величину тепловыделения при гидратации цемента оказывает влияние минералогический состав клинкера.

Минералогический состав цементов и значения удельного тепловыделения при его гидратации приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Минеральный состав цементов и удельное тепловыделение при гидратации

№ п/п	Наименование цемента	Содержание минералов, %				Удельное тепловыделение, кДж/кг
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
1	Новороссийский ЦЕМ I 42,5 Н	65	12	4	13	502
2	Белгородский ЦЕМ I 42,5 Н	61	17	5	12	505
3	Себряковский ЦЕМ I 42,5 Н	62	12	9	12	560

Для интегральной величины тепловыделения в процессе гидратации цемента существенное значение имеет содержание C₃A. У цемента Себряковский ЦЕМ I 42,5 Н количество C₃A составляет 9 % и величина удельного тепловыделения практически на 10 % или на 55 кДж/кг выше, чем у двух других низкоалюминатных цементов. Повышенная начальная температура газобетонной смеси (43 °С) и ее быстрый рост при выдерживании массива в камере

предварительного твердения способствуют увеличению степени гидратации и значимости выделяемой энергии при гидратации цемента в термическом потенциале газобетонных смесей.

В процессе формирования структуры газобетонной смеси происходит изменение ее состава: алюминиевый газообразователь преобразуется в кальциевые гидраты; из оксида кальция образуется гидроксид; появляются первичные продукты гидратации цемента. Однако существенного изменения теплоемкости смесей за счет протекания реакций гидратообразования не происходит, так как удельная теплоемкость безводных компонентов и гидратных фаз находится на одинаковом уровне.

Тепловыделение (энергетический потенциал) газобетонных смесей марок по средней плотности от $D100$ до $D600$ приведен на рисунке 3.4.

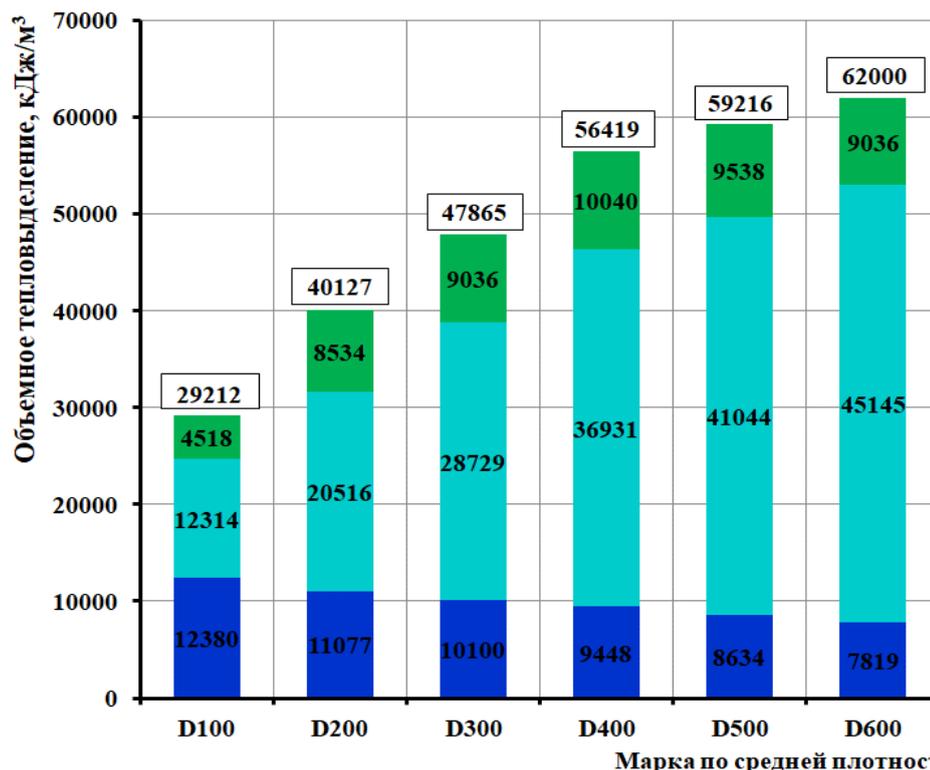


Рисунок 3.4 – Тепловыделение в газобетонных смесях: ■ – алюминий газообразователя; ■ – оксид кальция; ■ – цемент ЦЕМ I 42,5 Н; □ – суммарный потенциал

По полученным данным (рисунок 3.4) газобетонных смесей с маркой по средней плотности $D100$ существенный вклад в тепловыделение в смеси вносит реакция с алюминиевым газообразователем. Начиная с марки по средней плотности $D200$ величина тепловыделения реакции составляет уже четверть от

суммарного объемного тепловыделения, а в газобетонной смеси для марки по средней плотности $D500$ – 15 %. Чем меньше проектная марка по средней плотности, тем существенней роль дисперсного алюминия в формировании теплового режима в газобетонной смеси.

Степень гидратации для цемента принята $\alpha = 0,2$. Вклад твердеющего цемента в суммарное тепловыделение при предварительном твердении массива для технологии автоклавного газобетона незначительна. Для марок по плотности от $D200$ до $D600$ тепловыделение практически не меняется, составляя соответственно 8534 кДж/м^3 и 9036 кДж/м^3 .

Основную роль в формировании теплового режима массива играет негашеная молотая известь. Если для газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ экзотермия от реакций CaO и Al сопоставима, то уже для смесей марки по средней плотности $D200$ вклад CaO в суммарное тепловыделение в 2 раза больше. Для марки по средней плотности $D500$ объемное тепловыделение за счет извести составляет 41044 кДж/м^3 или 70 % от суммарного.

Приращения температуры в газобетонных смесях с марками по средней плотности от $D100$ до $D600$ приведены на рисунке 3.5.

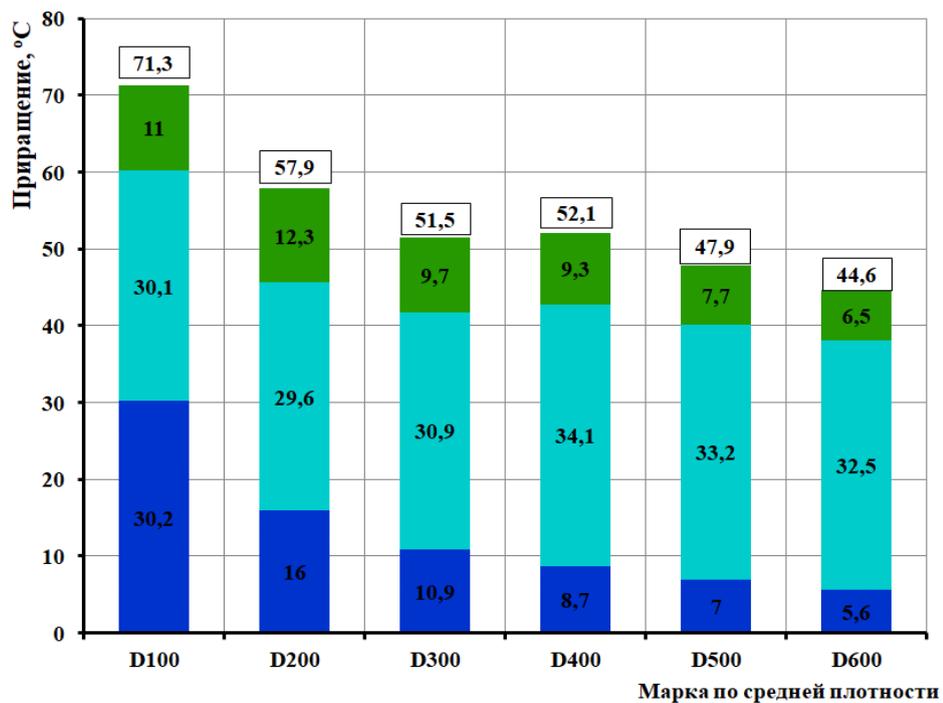


Рисунок 3.5 – Температурные приращения в газобетонных смесях:
 ■ – алюминий газообразователя; ■ – оксид кальция; ■ – цемент;
 □ – суммарный потенциал

На рисунке 3.6. даны расчетные температуры в газобетонных смесях и массиве для исходной температуры смеси при ее заливке в форму, равной 43 °С.

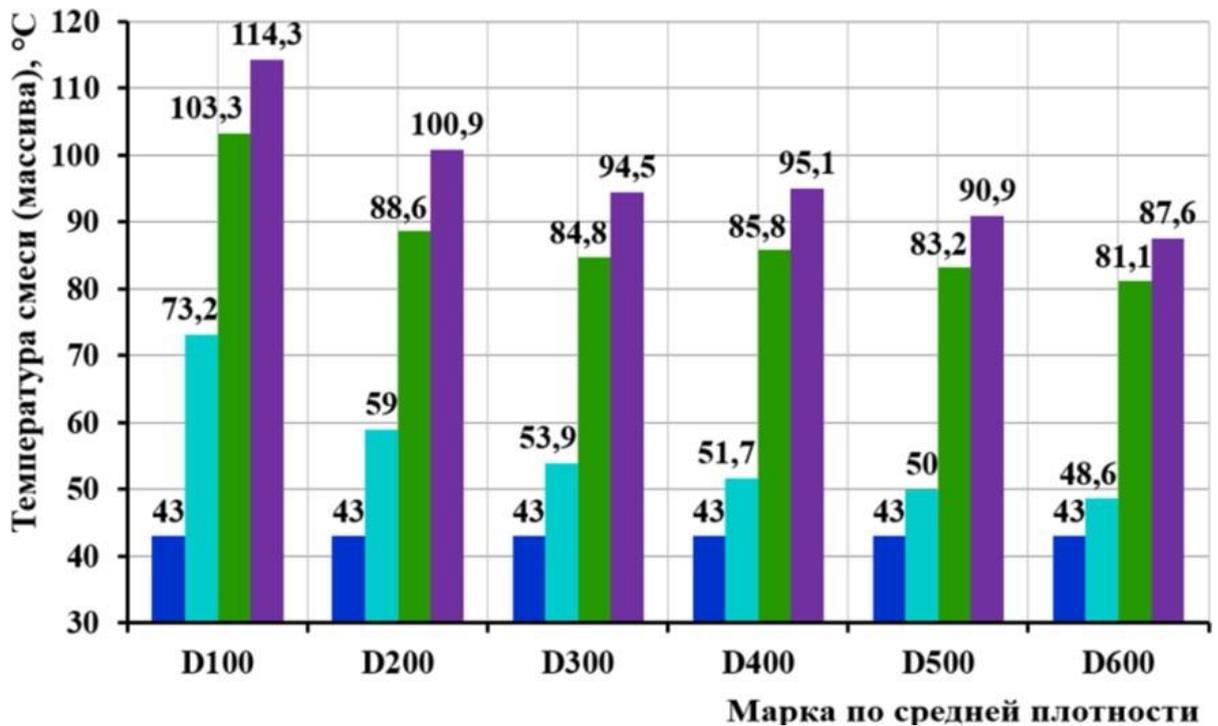


Рисунок 3.6 – Расчетные температуры в газобетонных смесях (массиве)

Технологический процесс от момента заливки газобетонной смеси в форму до распалубки массива по значимости термических реакций предлагается разделить на три стадии:

Первая – газообразование в смеси с формированием пористой структуры массива. Экзотермия в смеси за счет дисперсного алюминия наиболее значима для низких плотностей и составляет 30,2 °С у газобетонной смеси с маркой по средней плотности *D100* или 42,4 % суммарного прироста температуры. У газобетонных смесей с маркой по средней плотности от *D300* и выше экзотермия газообразователя повышает температуру газобетонной смеси менее чем на 10 °С, что составляет не более 20 % в суммарном градиенте температуры.

На второй стадии экзотермическим процессом является гидратация СаО с формированием коагуляционной структуры межпоровых перегородок. Заводы

автоклавного газобетона замедляют гидратацию извести добавкой гипса. Тем самым разделяются этапы формирования пористой структуры и первичной структуры – пластической прочности массива. Независимо от марки по средней плотности приращение температуры смеси от гидратации CaO составляет величину порядка 30 °С.

Третьей стадией является завершение структурообразования в массиве за счет твердения цемента. Экзотермические реакции гидратации цемента способствуют не существенному приращению температуры в газобетонной смеси. Образование игольчатых AFt и пластинчатых AFm-фаз придает газобетонному массиву пластическую прочность, необходимую для резки.

Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности *D100* и *D500* при изменении водотвердого отношения приведены на рисунках 3.7 и 3.8.

Вода является самым теплоемким компонентом газобетонной смеси. Водотвердое отношение служит одним из основных факторов в технологии автоклавного газобетона: при высоком В/Т – это литьевая технология, при низком В/Т – ударная. Количество воды в смеси можно рассматривать и как прием воздействия на температуру газобетонной смеси. Так в газобетонной смеси марки по средней плотности *D500* увеличение В/Т с 0,4 до 0,6 снижает расчетную температуру смеси после предварительного твердения с 95,0 до 81,7 °С при начальной температуре заливки 43 °С (рисунок 3.8). В газобетонной смеси с маркой по средней плотности *D100* изменение В/Т с 0,79 до 0,99 снижает приращение температуры с 75,1 до 62,4 °С.

Из рецептурных характеристик существенное влияние на температуру газобетонной смеси оказывает активность извести. Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности *D500* при изменении активности извести приведены на рисунке 3.9, а для газобетонной смеси с маркой по средней плотности *D100* – на рисунке 3.10.

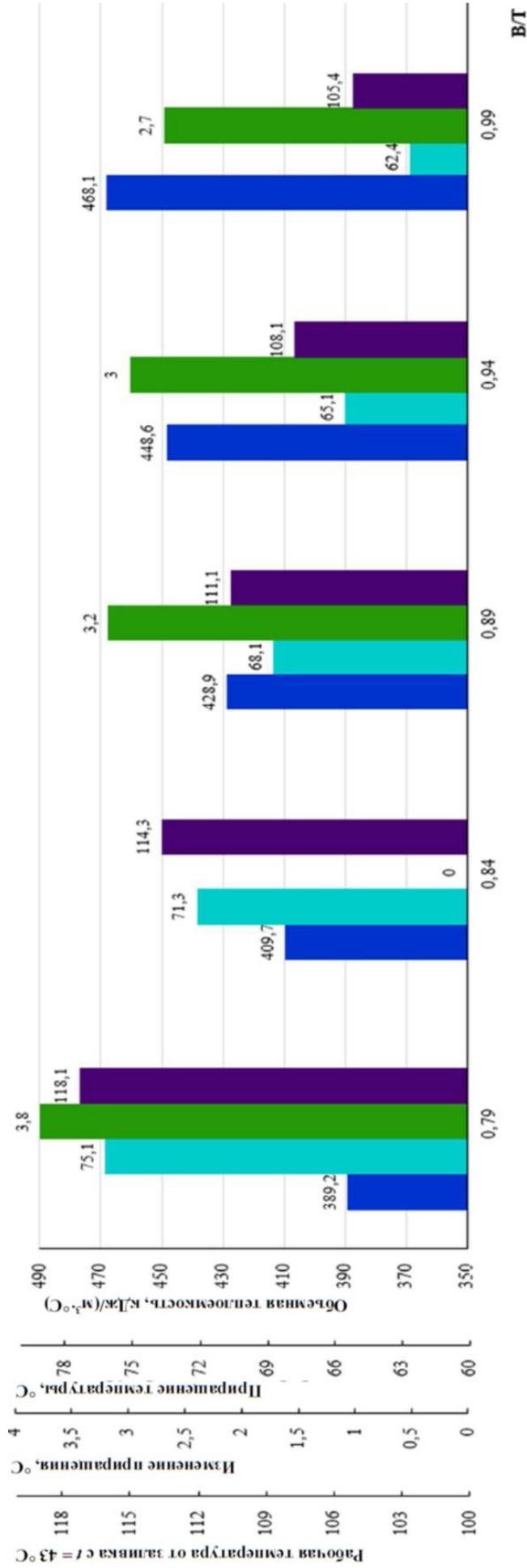


Рисунок 3.7 – Показатели газобетонной смеси марки D100 при изменении водотвердого отношения:

■ – объемная теплосмкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращению; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рисунок 3.8 – Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности D500 при изменении водотвердого отношения:
 ■ – объемная теплоемкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43^\circ\text{C}$

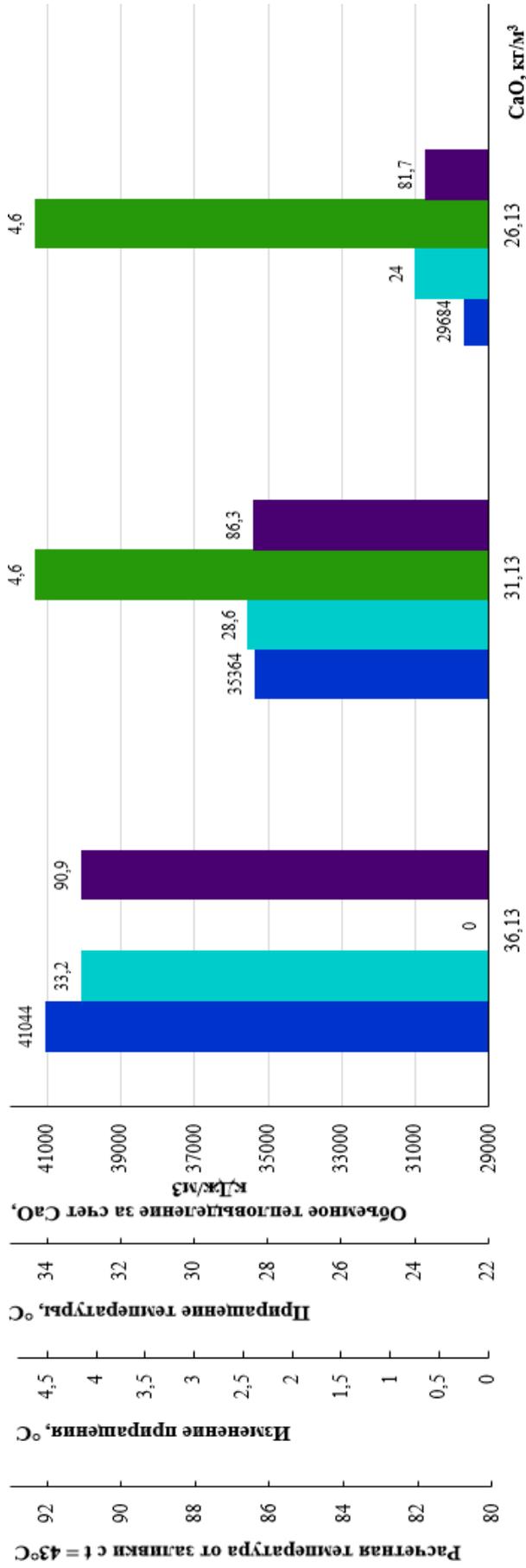


Рисунок 3.9 – Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ при изменении активности извести:

■ – объемная теплосмкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки с $t = 43^\circ\text{C}$

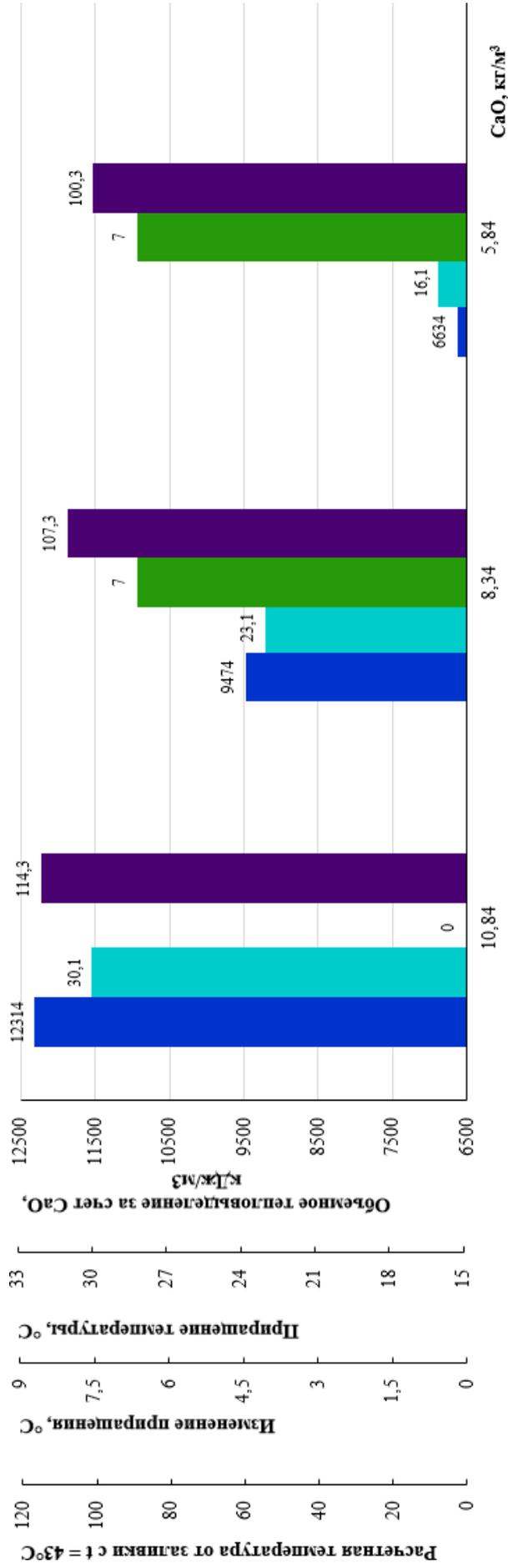


Рисунок 3.10 – Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D100$ при изменении активности извести:

■ – объемная теплосмкость; ■ – приращение температуры; ■ – изменение приращения; ■ – расчетная температура от заливки $t = 43^\circ\text{C}$

Большое влияние на температуру газобетонной смеси оказывает начальная температура борта и днища формы.

Показатели для газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ в форме приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Показатели газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ в форме

Наименование	Смесь	Борт	Днище
Начальная температура, °С	43,0	54,0	79,0
Теплоемкость, кДж/°С	8387	1902	577
Температура после газообразования, °С	50,0	54,0	79,0
Температура после гидратации СаО, °С	75,6	75,6	79
Температура завершения выдержки массива, °С	81,7		

При запуске технологии производства формы холодные, и значительное количество тепла от экзотермических реакций в газобетонной смеси идет на их нагрев. В стабильном технологическом процессе температура борта принята 54 °С, днища 79 °С. При таких температурах формооснастки температура газобетонной смеси марки по средней плотности $D500$ снижается с 90,9 до 81,7 °С к моменту завершения выдержки и распалубки массива.

Следовательно, газобетонная смесь за счет экзотермических процессов взаимодействия дисперсного алюминия, гидратации извести и начального твердения цемента имеет высокий термический потенциал с расчетным увеличением температуры смеси свыше 90 °С. Основной вклад в тепловыделение в смеси вносит оксид кальция. Значимыми показателями для теплового режима массива являются проектная марка по средней плотности, расход извести и водотвердое отношение. Расход тепла газобетонной смеси на нагрев формы и окружающей среды является негативным фактором, создающим термический градиент в массиве и связанные с этим напряжения.

3.4. Порообразование в газобетонной смеси

Поры – основной структурный элемент газобетона. Размер пор и происхождение пористости оказывают существенное влияние на свойства всех видов бетона гидратационного твердения. Создавая пористую структуру в процессе производства, изготавливают высокоэффективные материалы из ячеистого бетона.

Газовые поры, являющиеся основными в формировании структуры газобетона, разделены на следующие три вида [201]. Капиллярно-газовые поры с $d = 1-10$ мкм, которые являются индикатором появления в системе сферических пузырьковых пор. Мембранные газовые поры с формой близкой к сферической и размером от 10 до 100 мкм. Мембранные пузырьки в середине указанной размерной области по расчету переходят из недеформируемых в деформируемые. Третий вид – ячеистые поры с диаметром от 100 мкм до 2 мм, которые служат основой структуры газобетона. При существующей на сегодня технологии автоклавного газобетона можно стремиться, но невозможно достичь одинакового по высоте массива размера ячеистых газовых пор. В нижней части размер пор будет меньшим, хотя средняя плотность верха и низа может существенно не различаться.

Повышение значимости капиллярных сил в формировании пузырьковой системы будущих газовых пор – одно из перспективных направлений совершенствования технологии газобетона. В технологии автоклавного газобетона процесс формирования пузырьковой структуры сырцового массива, определяющий пористую структуру изделий, разделен на четыре стадии. Первая стадия – «воздухововлечение» при заливке смеси в форму. Вторая – «поризация» за счет образования газовых пузырьков при выделении водорода. Третья – «коалесценция» – слияние пузырьков с образованием сегментных пузырей. Четвертая стадия – «стабилизация» пузырьковой структуры в процессе гидратации вяжущих.

Исследованы автоклавные газобетоны разных плотностей $D500$, $D400$ и $D100$. Так, структура газобетона марки по средней плотности $D500$ практически всех производителей представлена ячеистыми порами и межпоровыми перегородками, которые сформированы гидросиликатами кальция и кремнеземом, что создает плотную структуру мембраны. Структура заводского автоклавного газобетона $D500$ от одного из производителей представлена на рисунке 3.11.

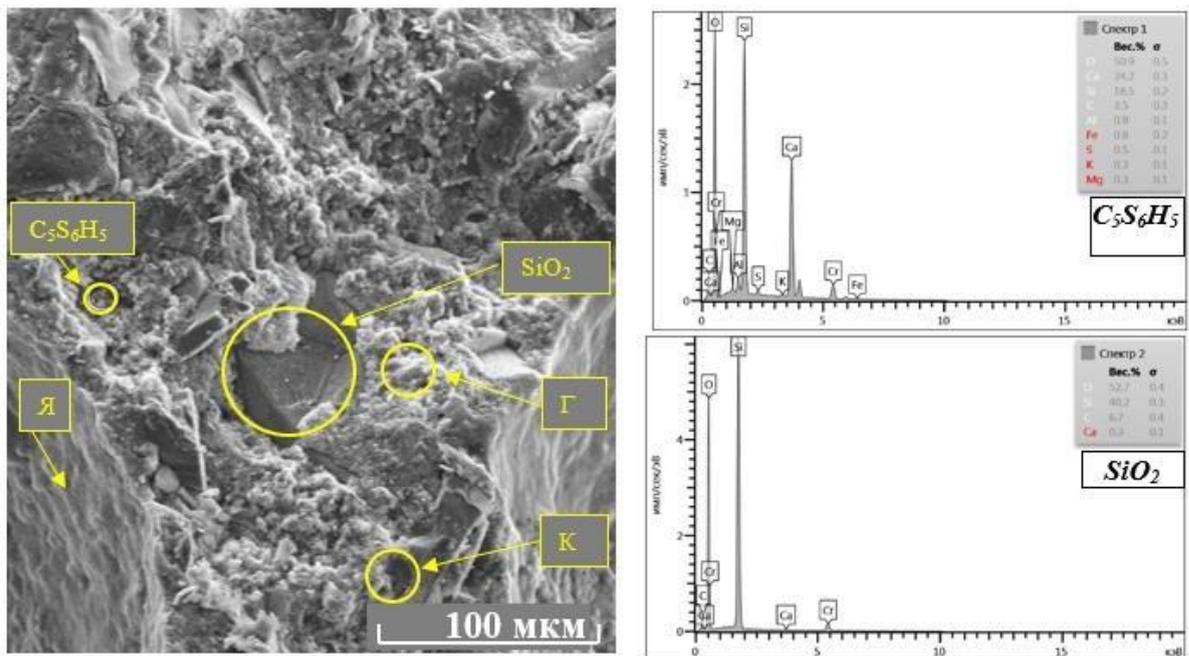


Рисунок 3.11 – Структура газобетона $D500$: Г – гелевые поры; К – капиллярные поры; Я – ячеистые поры

Гелевая пористость гидросиликата кальция, согласно данным Т. Пауэрса, составляет 28 % в геле затвердевших систем. Для рассматриваемого газобетона марки $D500$ была получена величина $0,0533 \text{ м}^3$. Удельный объем тоберморитовых новообразований равен $0,569 \text{ м}^3/\text{кг}$, что соответствует модели Т. Пауэрса с удельным объемом геля $0,567 \text{ м}^3/\text{кг}$. Размеры для гелевых пор определены в соответствии с рекомендациями IUPAC и предложением [95]: микрогелевые поры имеют диаметр $D < 2 \text{ нм}$, а мезогелевые – от 2 до 50 нм.

Ячеистые поры (рисунок 3.11, обозначение «Я») – поры с размером от 0,1 мм или от 100 мкм до 2 мм. Если поры более крупные, то характеристики изделий

ухудшаются, при этом теплопроводность при одной и той же средней плотности и классу по прочности будет снижаться до 20 %.

На рисунке 3.11 представлена межпоровая перегородка с размером 100 мкм. Для ячеистого бетона с маркой по средней плотности $D500$ это характерная величина межпоровой перегородки. Также приведены пузырьковые поры, имеющие закономерный характер, стремящийся к шарообразному, в отличие от капиллярных пор (рисунок 3.11, обозначение « K »), капиллярные поры – бесформенные. Капиллярные и гелевые (рисунок 3.11, обозначение « Γ ») поры в структуре автоклавного газобетона являются результатом гидротермального синтеза гидросиликатов кальция – $C_5S_6H_5$ (тоберморит), а SiO_2 – это остаточные зерна песка.

На рисунке 3.12 приведен фрагмент структуры автоклавного газобетона марки по средней плотности $D500$ с высокоорганизованной структурой ячеистых пор и с совершенной структурой межпоровых перегородок. Представленная пора размером менее 100 мкм свидетельствует о способности пузырька в процессе формирования структуры к деформированию.

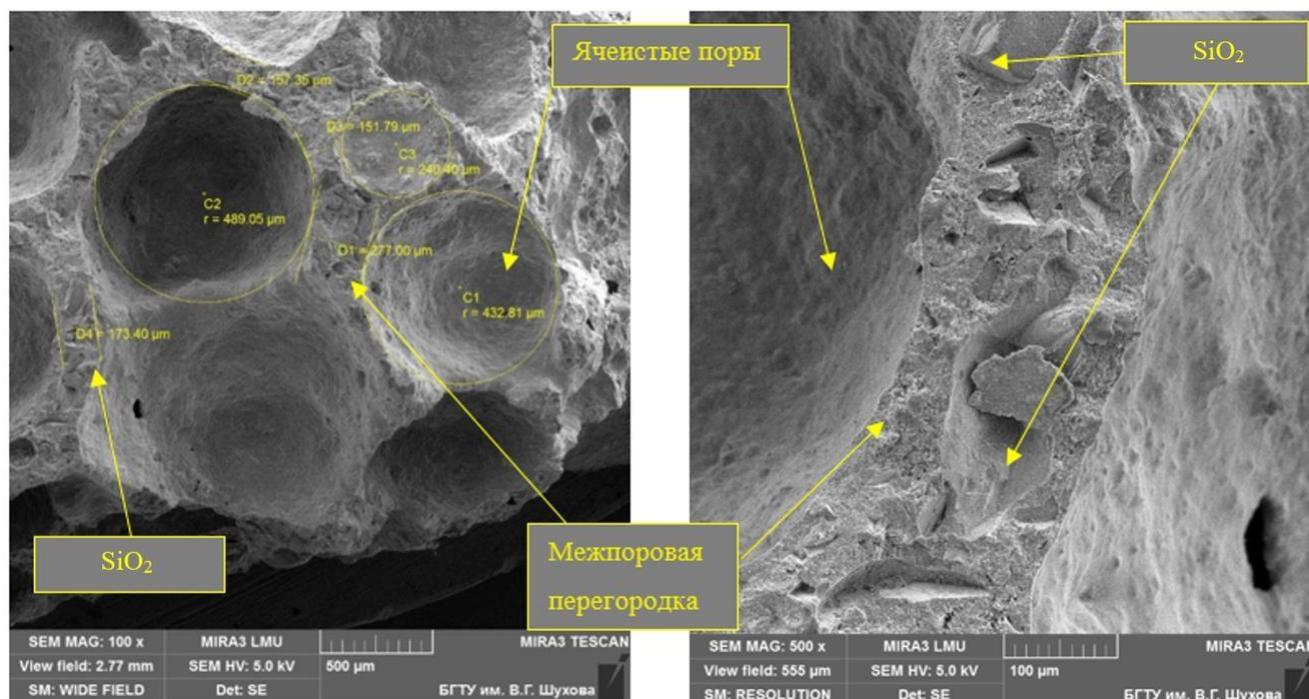


Рисунок 3.12 – Газовая пористость газобетона $D500$

В структуре образца газобетона марки по средней плотности *D500* (рисунок 3.13) пузырек дал мембранную пору, находящуюся в межпоровой перегородке. Он формирует структуру автоклавного ячеистого бетона наравне с теми пузырьками, которые образовались при взаимодействии дисперсного алюминия с гидроксидом кальция (алюминиевая паста или алюминиевая пудра).

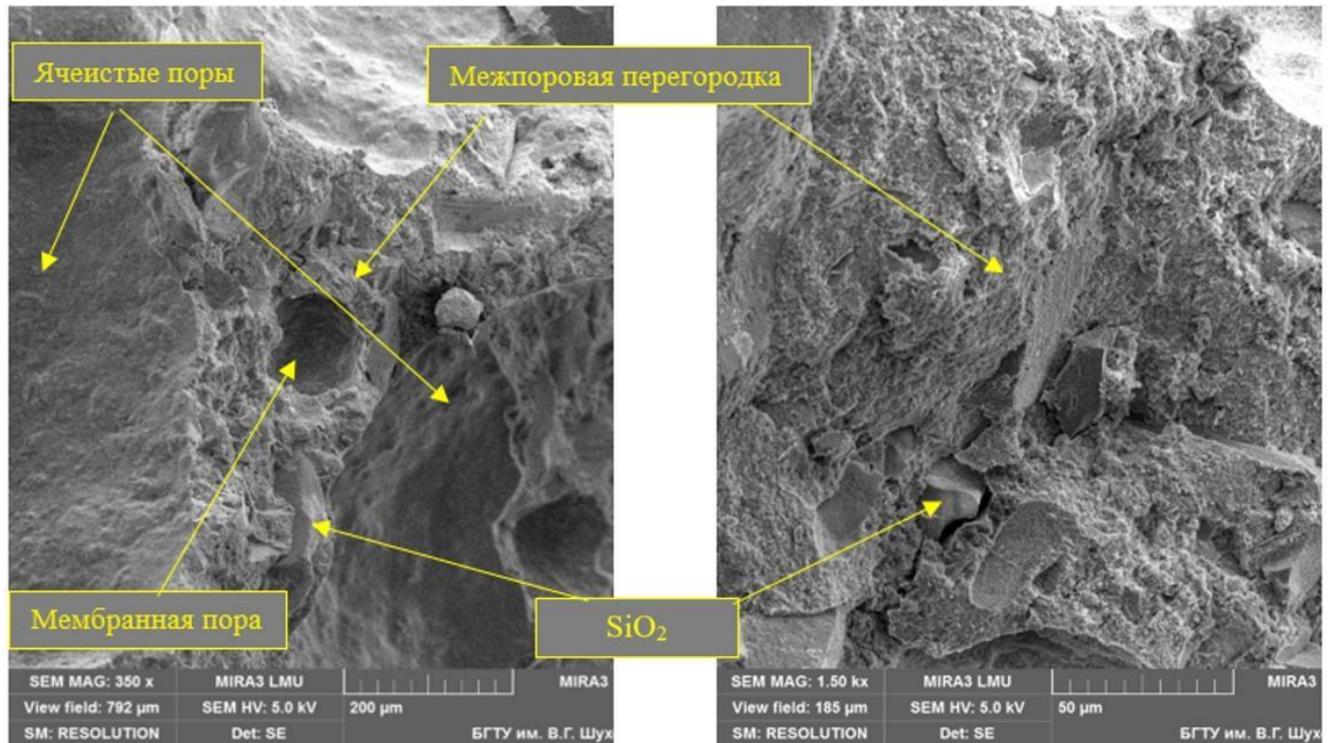


Рисунок 3.13 – Межпоровая перегородка газобетона *D500*

Фрагмент структуры ячеистого бетона марки по средней плотности *D500* (рисунок 3.14), свидетельствует о том, что имеется возможность снятия напряжения в автоклавном газобетоне, но этот потенциальный резерв недостаточно изучен и не используется. Если растут новообразования с увеличением объема твердой фазы, то кристаллизация идет потенциально и в пузырек, и в свободное пространство. На большинстве мембранных пор наблюдается, как показано на рисунке 3.14, кристаллизация во внутрь поры и крупных пузырьках с размером более 100 мкм имеет место уплотненная наружная оболочка.

Между уплотненными наружными оболочками ячеистых пор находятся новообразования, структура которых пронизана капиллярными и гелевыми порами.

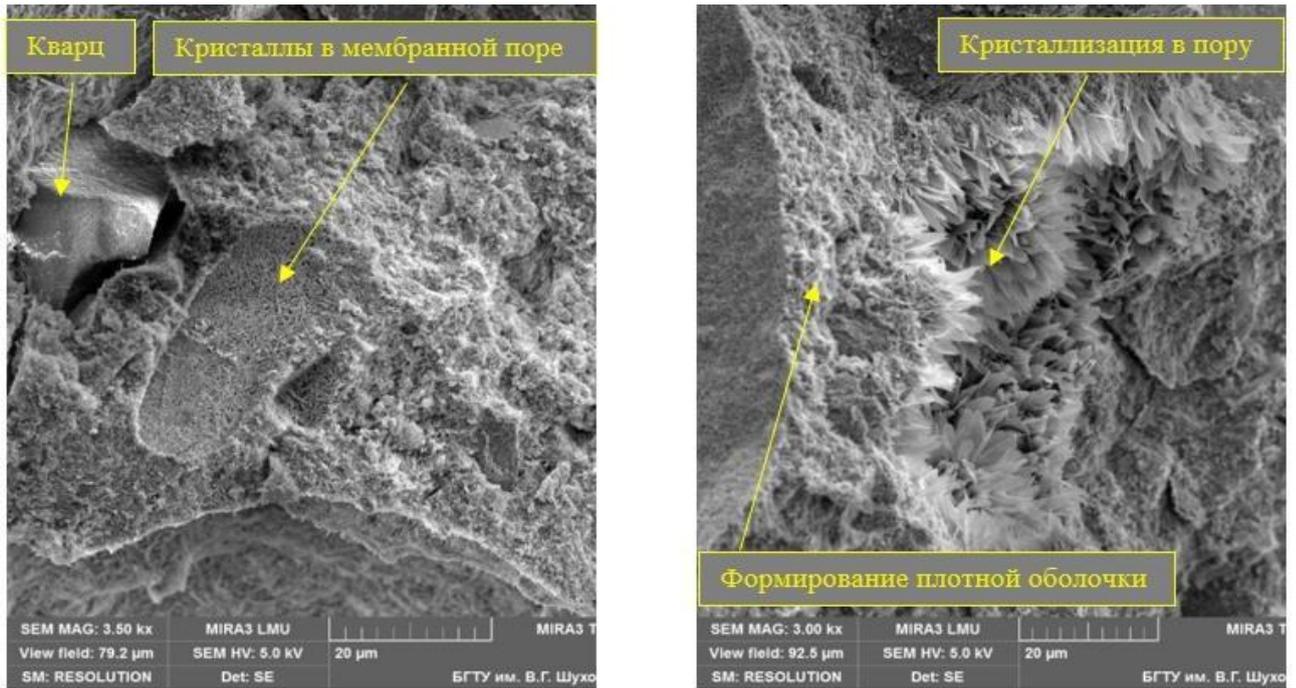


Рисунок 3.14 – Кристаллизация в порах газобетона *D500*

На рисунке 3.15 показан мембранный пузырек с новообразованиями, растущими вовнутрь. Размеры пузырька сопоставимы с размером частиц цемента. Он является типичной порой в ячеистом бетоне, что свидетельствует о необходимости целенаправленно управлять пористой структурой для улучшения теплозащитных свойств и повышения прочности.



Рисунок 3.15 – Мембранная пористость газобетона *D500*

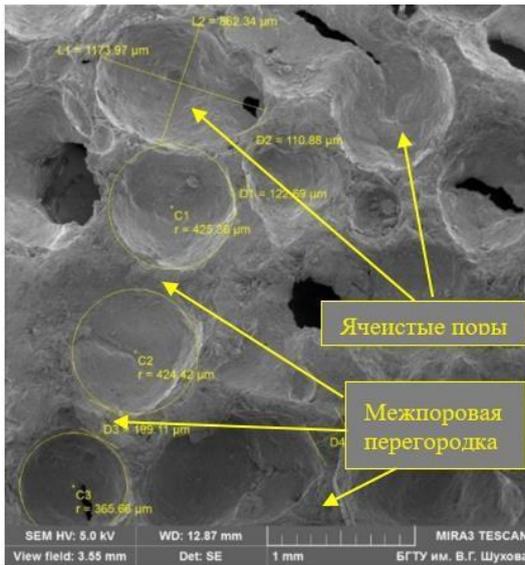


Рисунок 3.16 – Ячеистая пористость газобетона *D400*

На рисунке 3.16 продемонстрирован характер формирования структуры ячеистого бетона *D400*, причем у различных производителей ячеистого бетона характер формирования структуры практически одинаковый. Когда формируется структура газобетона *D400* и *D500*, то принципиально не изменяется пористая структура готового композита. Проведенные лабораторные и экспериментальные исследования в заводских

условиях свидетельствуют о возможности управления размерами пузырьков в сырцовом массиве, а, следовательно, размерами пор, то представляется возможным получение высокоорганизованной структуры ячеистого бетона.

На рисунке 3.17 представлена структура газобетона марки по средней плотности *D400* с идеальной межпоровой перегородкой со сходящимся каналом Плато с маленькой порой или пузырьком с кристаллизацией новообразований внутри него. Наиболее востребованная и сейчас производимая номенклатура ячеистобетонных изделий марок по средней плотности *D400* и *D500* характеризуется практически сопоставимыми параметрами пористой структуры. Чтобы формировать более высокоорганизованную структуру, необходимо уделять внимание такому вопросу, как создание пор в перегородках между крупными ячеистыми порами размером более 100 мкм (0,1 мм). Добиваясь логнормального распределения пор по размеру, если, стремясь к тому, чтобы тах логнормального распределения находился на менее 500 мкм (0,5 мм), возможно получение высокоорганизованной структуры ячеистого бетона с улучшенными эксплуатационными показателями.

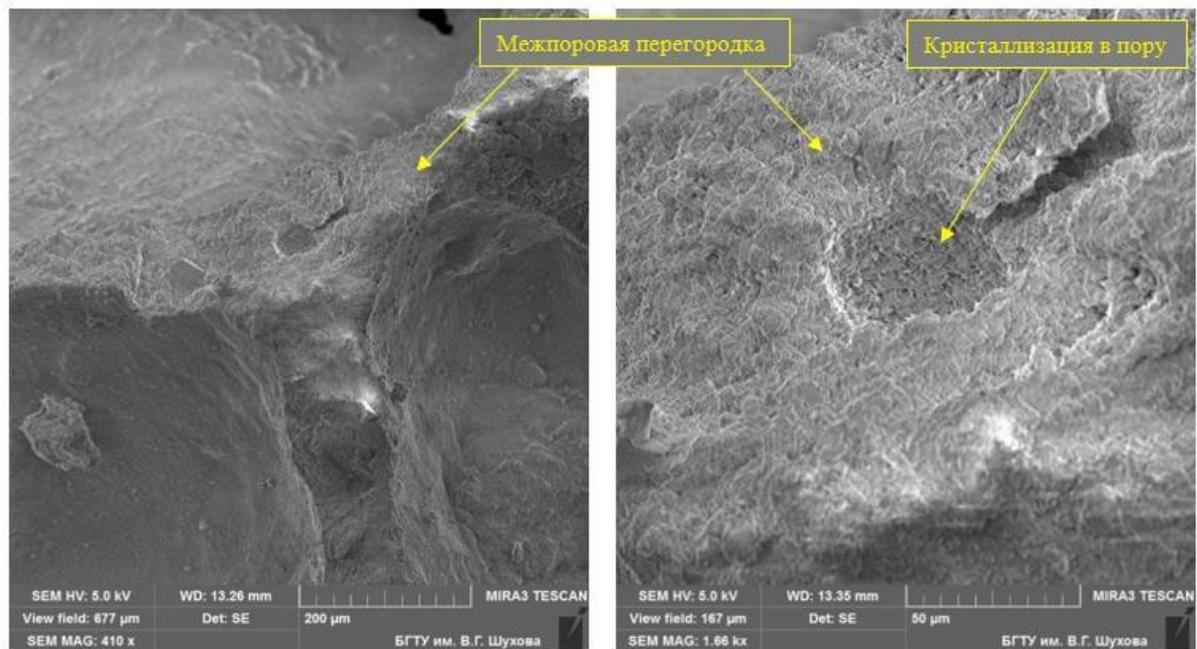


Рисунок 3.17 – Межпоровая перегородка газобетона *D400*

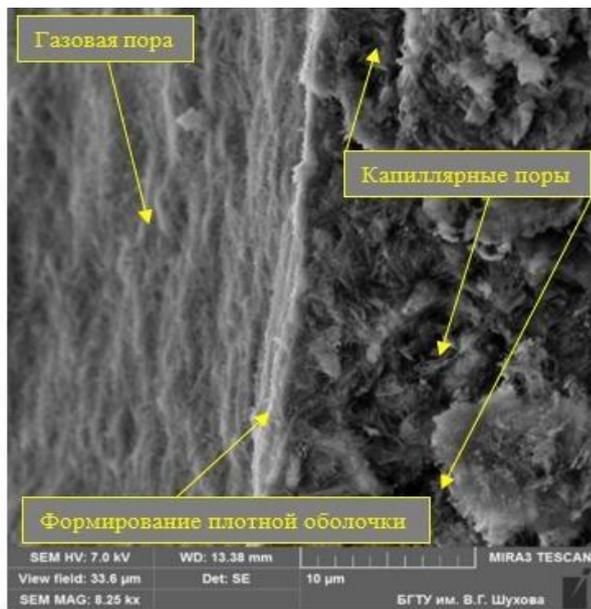


Рисунок 3.18 – Капиллярная пористость газобетона *D400*

Капиллярные поры (рисунок 3.18) – это бесформенное пространство, которое негативно влияет на прочность, водостойкость, поглощение влаги из окружающей среды, морозостойкость ячеистого бетона.

Микрофотография демонстрирует формирование плотной оболочки на крупных ячеистых порах, которые образовались из газовых пузырьков.

На рисунке 3.19 представлена структура автоклавного газобетона марки по средней плотности *D100*. Здесь происходят существенные изменения в структуре формирования пузырьков сырцового массива. Пузырек, который находится в канале Плато выполняет роль газового пузырька. На порядок меньшие пызырьки в межпоровых перегородках определяют пористую структуру и выполняют функциональную роль, как и твердые частицы.

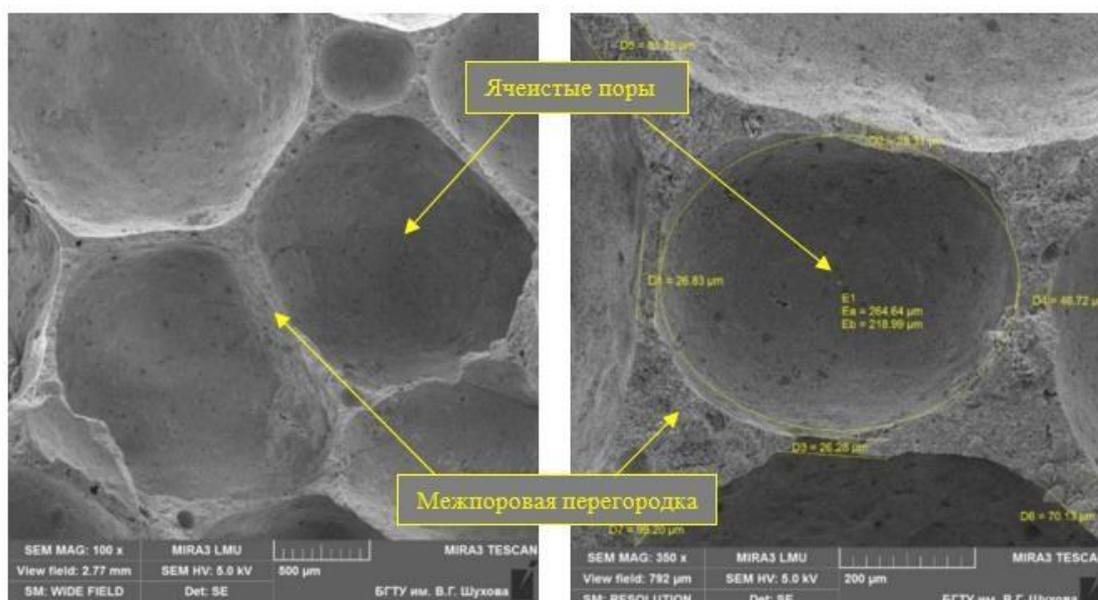


Рисунок 3.19 – Газовая пористость газобетона *D100*

Межпоровая перегородка газобетона *D100* (рисунок 3.20) однородна. Структура межпоровых перегородок сформирована элементами размером менее 20 мкм. Это предопределяет жесткие требования к дисперсности ингредиентов в смесях для газобетона *D100*.

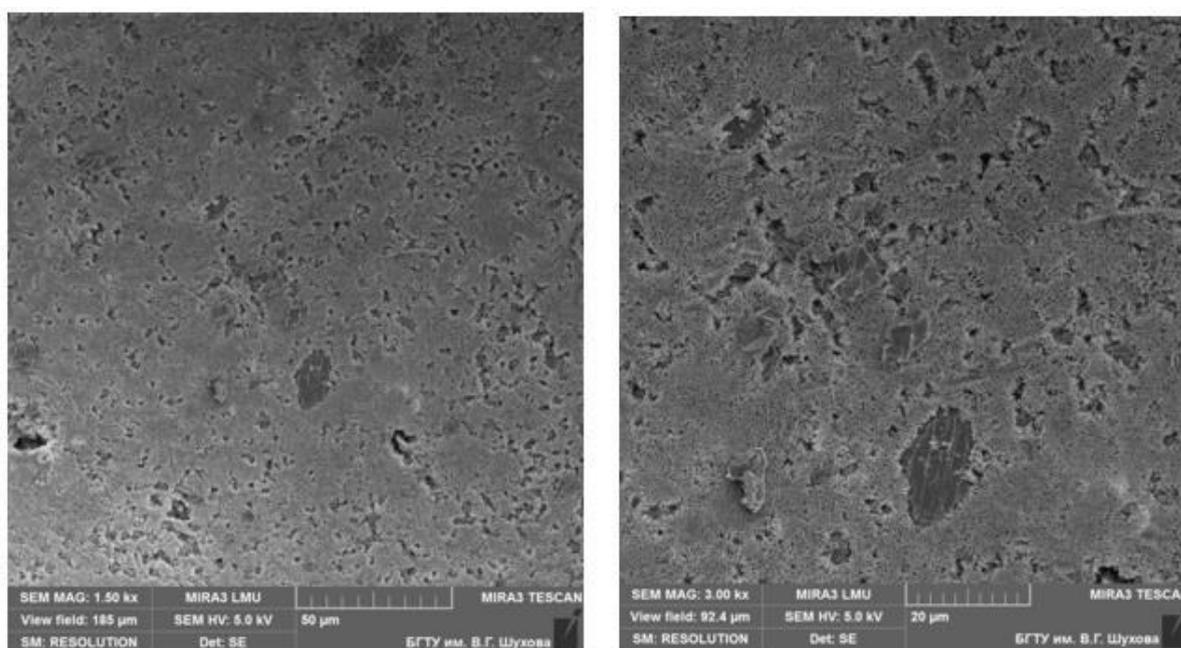


Рисунок 3.20 – Плотная структура межпоровой перегородки газобетона *D100*

В структуре газобетона при большом увеличении (менее 10 мкм) (рисунок 3.21) фиксируется конгломератное строение с новообразованиями и

заполнителем. Также наблюдаются капиллярные поры, которые негативно влияют на свойства газобетона.

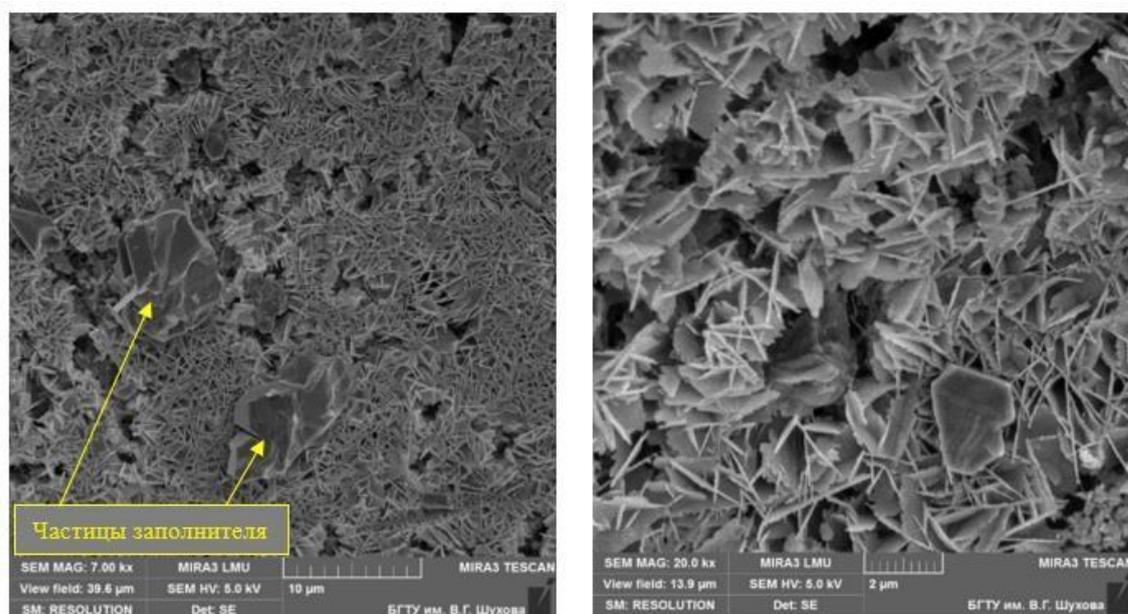


Рисунок 3.21 – Конгломератное строение с частицами заполнителя новообразованиями

Характер формирования пор или пузырьков, находящихся между крупными, сохраняется (рисунок 3.22). Кристаллизация новообразований идет вовнутрь. Жесткие поры – это проявление свойств аналогичных твердым частицам. Роль частицы цемента или пузырька размером менее 20 мкм не различить, а если взять больше таких пузырьков в смеси, то возможна экономия цемента.

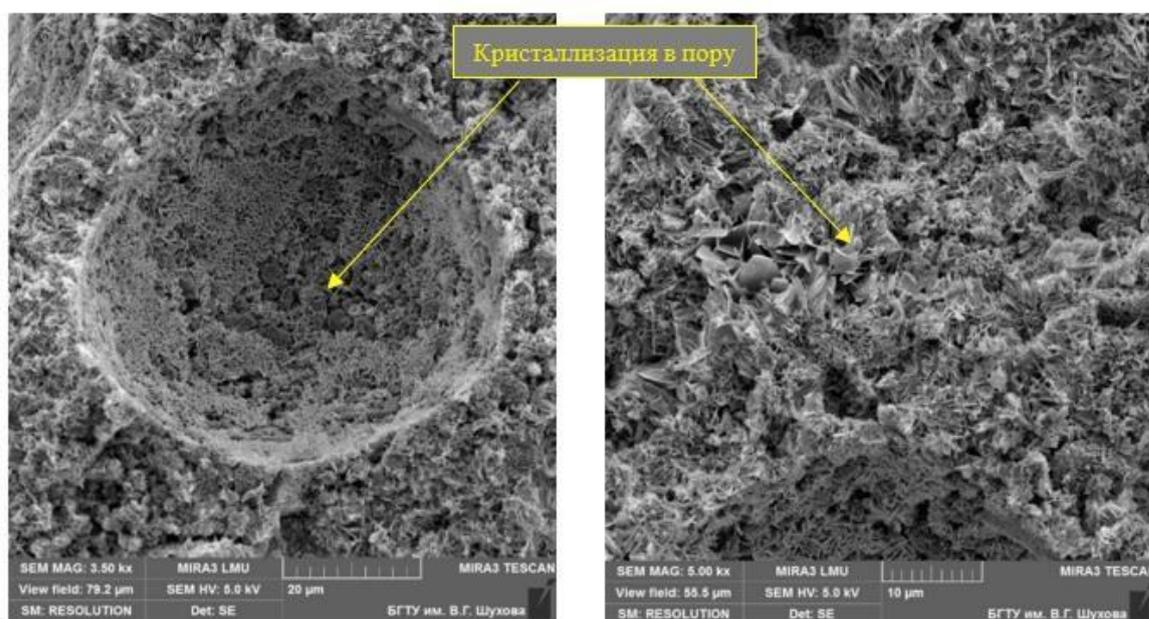


Рисунок 3.22 – Мембранная пористость газобетона D100

Перспективой технологии ячеистого бетона является снижение максимального и среднего размера пор для выделенных областей мембранных и ячеистых газовых пор. Уменьшение размера пузырьков в твердеющей системе отразится на снижении числа Бонда и повысит значимость капиллярных сил в формировании поровой структуры ячеистого бетона.

3.5. Характеристика крупных пор в структуре газобетона

Как известно, структура ячеистых бетонов представлена ячеистыми порами и межпоровыми перегородками, сформированными гидросиликатами кальция и кремнеземом, что создает плотную твердую фазу мембраны. Пористость газобетона за счет газовыделения образуется в интервале от момента заливки ячеистобетонной смеси до 30 мин, а свойства межпоровых перегородок, фиксирующих пористость окончательно, формируется при автоклавировании. Помимо пористой структуры и первичной структуры межпоровых перегородок в газобетонной смеси в доавтоклавный период образуются дефекты структуры, являющиеся предметом исследования.

На основании проведенного анализа предложена классификация и сопоставление видов дефектов с их природой (рисунок 3.23). Показано, что основными дефектами макропористой структуры, обусловленными технологическими операциями и формируемыми в доавтоклавный период, являются: поры воздухововлечения – как результат турбулентности смеси в процессе заливки (гидродинамическая природа дефектов); макропористость, образованная из-за укрупнения функциональных пузырьков в результате физико-химического явления коалисценции и появления сегментного пузыря с его последующими изменениями (физико-химическая природа дефектов), диагональные трещины, разрывы сплошности, образованные как результат экзотермических процессов на стадии предварительной выдержки из-за большого градиента температур между ядром и поверхностью массива (термическая природа дефектов), а также сколы углов, трещины, образованные в процессе резки массива (механическая природа дефектов).

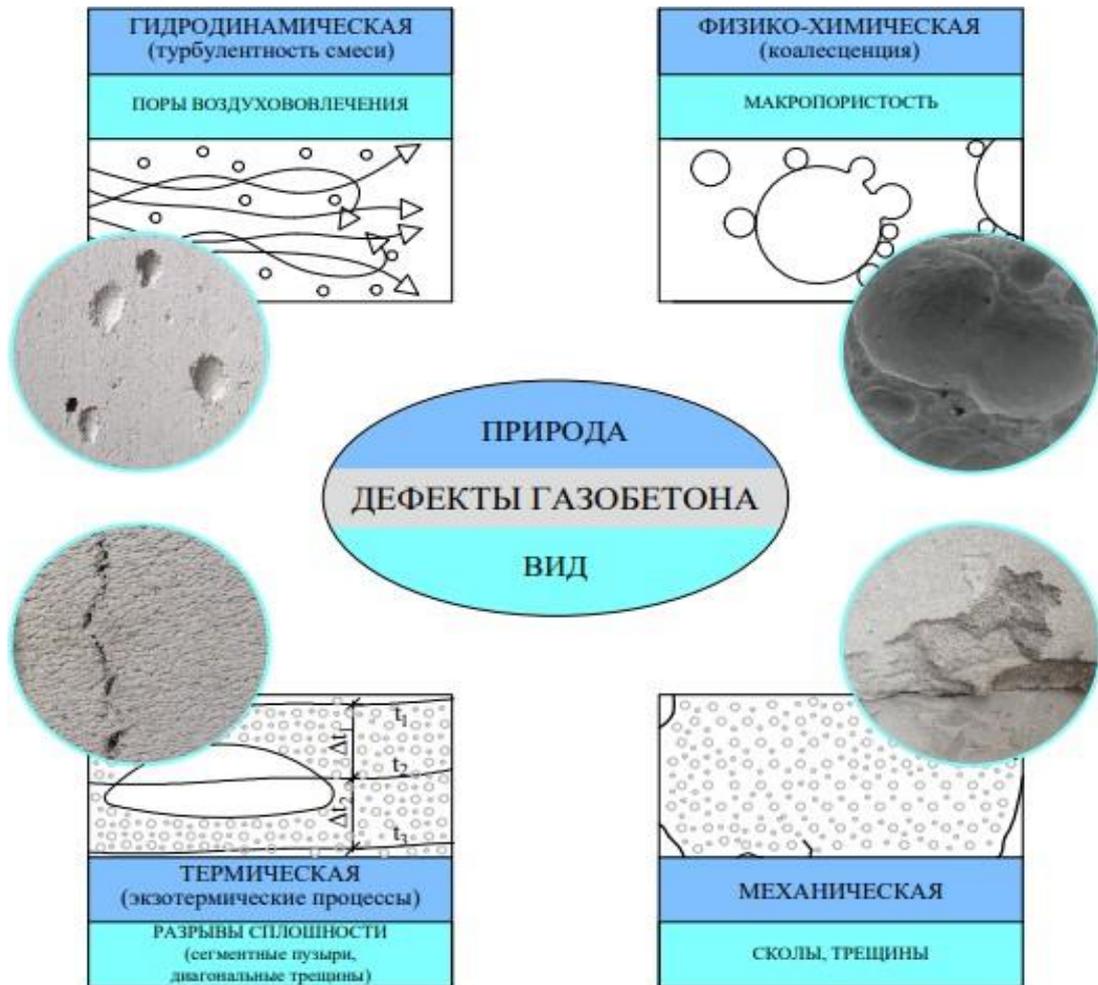


Рисунок 3.23 – Сопоставление природы и вида дефектов газобетона

3.5.1. Поры воздухововлечения

Поры воздухововлечения выделены в структуре газобетона в отдельный вид. Они представляют собой пространственные полости, размером до 30 мм и образуются в процессе заливки газобетонной смеси в формы. Эти поры являются дефектами структуры материала, их формирование связано с технологическими процессами и условиями производства [201-203].

Исследование пористой структуры и пор воздухововлечения газобетона представляет значимый интерес в связи с несколькими аспектами. Прежде всего это связано с поиском методов улучшения качества и характеристик газобетонных конструкций. Глубокое понимание пористой структуры может привести к разработке новых формул смесей и технологий производства, направленных на улучшение прочности, теплоизоляции и долговечности материала. Кроме того, в

контексте экологической устойчивости и энергоэффективности строительных материалов, изучение пористой структуры газобетона актуально для оптимизации энергопотребления в процессе производства изделий и эксплуатации зданий.

Поры воздухововлечения образуются в текучих системах при смешении компонентов и заливках массы в формы. Размер пор вдоль вертикальной оси в ячеистобетонных смесях составляет как правило величину от 2 до 30 мм. Воздух вовлекается в смесь в процессе перемешивания сырьевых компонентов и при заливке смеси в формы (рисунок 3.23). Ни одна из конструкций сливных устройств между смесителем и формой не избавляет от воздухововлечения.

Пузырьки воздухововлечения приобретают в смеси форму «перевернутой капли» (рисунок 3.24) и стремятся переместиться к поверхности, но не выходят из смеси ни на ударном столе, ни при виброобработке. Перемещение пузырьков воздуха вверх прерывается за счет их блокировки мелкими водородными пузырьками и по причине формирования коагуляционной структуры в твердеющей смеси. Радиус лобовой части пузырьков (R_1) больше, чем донной (R_2) и значительно меньше, чем у соединяющей их боковой поверхности (R_3): $R_3 \gg R_1 > R_2$.

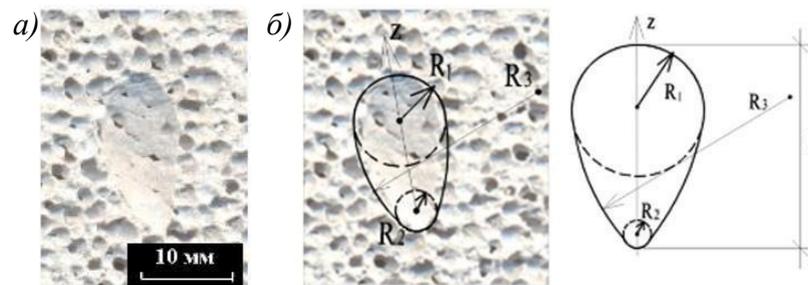


Рисунок 3.24 – Поры воздухововлечения: *a* – в ячеистом бетоне; *б* – форма пор

Поры воздухововлечения в изделиях из ячеистых бетонов могут быть как единичные, так и многочисленные (рисунок 3.25).

В стеновых конструкциях дефекты воздухововлечения снижают прочность материала до 40 % и ухудшают теплоизоляционные свойства на 10-15 % за счет конвективной составляющей.

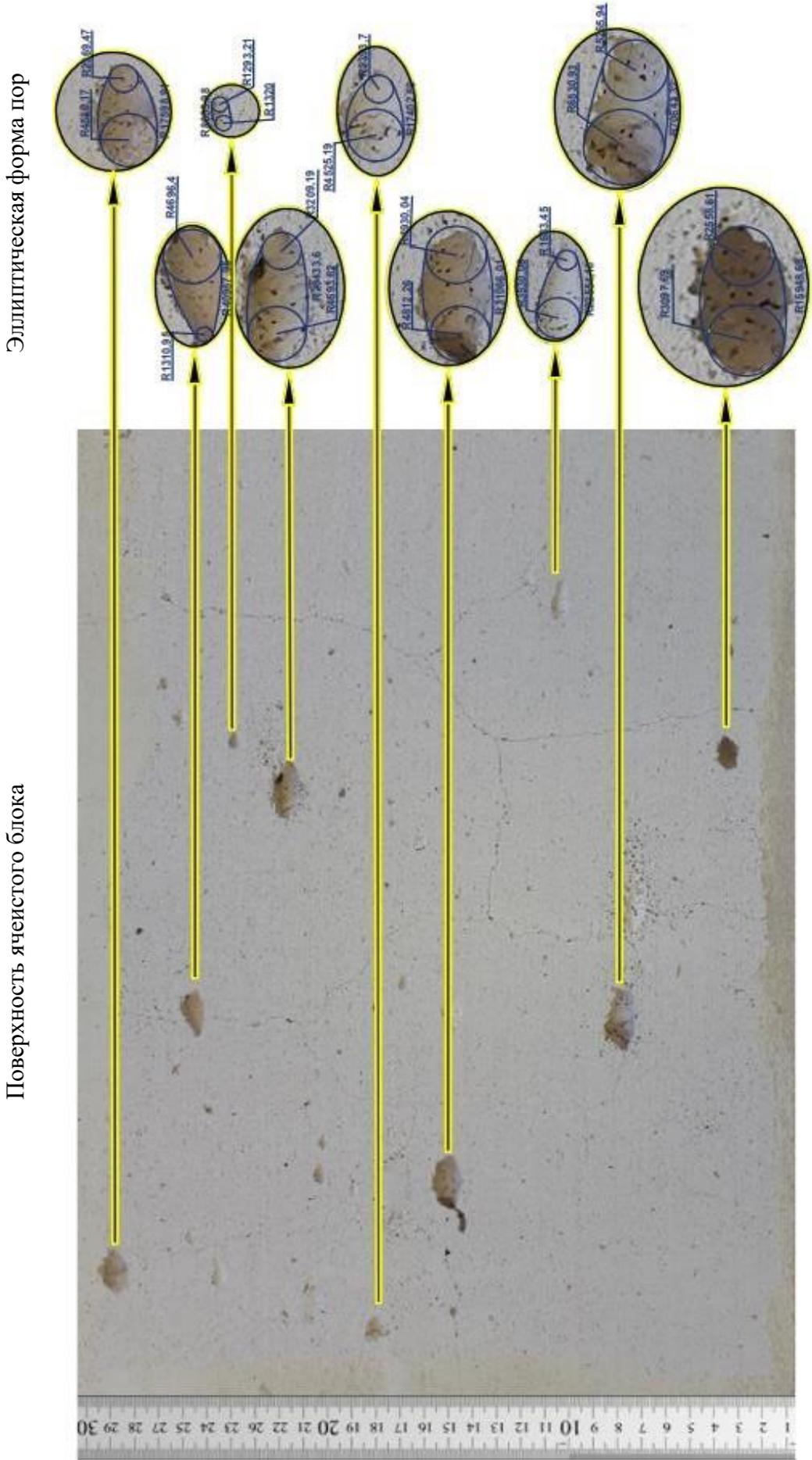


Рисунок 3.25 – Поры воздухововлечения в газобетонном блоке

Крупные поры воздухововлечения являются существенными дефектами в структуре ячеистого бетона, исключение которых имеет критическое значение. Формирование таких пор приводит к нарушению целостности и равномерности внутренней структуры материала, что снижает его прочность и теплоизоляционные свойства. Поэтому важно избегать образования крупных пор воздухововлечения в процессе производства ячеистого бетона.

Определение статуса пор воздухововлечения как отличительной черты материала позволяет значительно расширить наши знания о формировании и организации ячеистой структуры. Это включает в себя не только выявление наличия крупных пор, но и анализ их распределения, формы и влияния на общую структуру материала. Углубленное изучение статуса этих пор позволяет разрабатывать более эффективные методы контроля качества при производстве ячеистого бетона и улучшать технологии его производства для предотвращения образования дефектов, что в свою очередь способствует повышению надежности и долговечности изделий.

При производстве газобетона залитая в формы газобетонная смесь находится в турбулентном режиме до 10 с. Завершив перемещение и заняв горизонтальное положение в форме, смесь начинает подниматься вверх за счет протекающих физико-химических процессов газообразования. Наблюдения показывают отсутствие видимых перемещений на бугристой поверхности. Эта бугристость, возникающая в начальный момент исходного турбулентного состояния смеси, почти не меняется до момента резки массива. Возвышения на поверхности, достигающие высоты до 3 мм, объясняются наличием воздуха, вовлеченного в газобетонную смесь. Данные возвышения неизменны и сохраняют свою форму в течение времени, пока смесь не достигнет этапа резки массива. Такое поведение газобетонной смеси связано с процессами газообразования, вовлекающими воздух и формирующими бугры на поверхности. Данный этап перемещения смеси в форме является важным, так как он определяет структуру и характеристики готового ячеистого бетона. Воздушный пузырь, который формирует бугорок на поверхности, четко наблюдается при разделении готового блока на срез. Это

связано с процессом образования пор воздухововлечения и их влиянием на формирование структуры материала. Если после формирования массива по высоте в камере предварительного твердения проколоть бугорок на поверхности, то образуется углубление, или лунка. Визуальное наблюдение за поверхностью и фотосъемка показывают, что поры воздухововлечения не перемещаются. Пузырек, находящийся у поверхности, не прорывает ячеистобетонную смесь и не вызывает лопания, как это происходит с порами воздухововлечения в воде.

Поры имеют три радиуса кривизны R_1 , R_2 и R_3 . Размер пор зависит также от расстояния между центрами полусфер с R_1 и R_2 .

С целью анализа распределения пор в структуре ячеистых бетонов была проведена серия замеров, направленных на изучение их размеров и характеристик, с использованием разработанного способа определения пористости ячеистых бетонов (приложение Б). Данный метод основан на анализе изображений лицевой поверхности газобетона, особенностью которого является заполнение пор воздухововлечения измельченным аморфным углеродом для последовательного сравнения интенсивности каждого из трех цветовых компонентов: красного, зеленого и синего, для каждого пикселя изображения. Измельченный аморфный углерод в данном случае позволяет увеличить различия в градиентах пикселей на полученных изображениях [191].

Анализ изображений лицевой поверхности газобетона проводился по сформированному программному алгоритму, основанному на бинаризации изображения поверхности ячеистого бетона, определении общей поверхностной пористости с установлением частной пористости для конкретных диаметров, в том числе размеры пор воздухововлечения с учетом характера радиусов кривизны R_1 , R_2 и R_3 и расстояния между центрами полусфер с R_1 и R_2 , и формировании массива данных о распределении пор по размерам, площадям и объемам.

Статистические данные результатов замеров 100 пор воздухововлечения в образцах ячеистого бетона позволили выделить мелкие (до 50 мм^3), средние (от 50 до 500 мм^3) и крупные поры (500 мм^3 и выше), а также характеристику

равных по объему сферических пор. Характер распределения пор по их объему представлен в таблице 3.9 и на рисунке 3.26.

Таблица 3.9 - Размеры пор воздухововлечения

№ п/п	Наименование	Радиусы			Объем, мм ³
		R_1 , мм	R_2 , мм	R_3 , мм	
1	2	3	4	5	6
1.	Крупная (V от 500 мм ³ и выше)	8,31	2,18	22,97	3366,76
2.		8,32	1,91	28,04	2846,53
3.		6,53	5,26	70,64	2396,29
4.		4,93	4,81	31,06	1479,22
5.		5,89	3,12	36,54	1362,23
6.		4,69	3,20	29,43	1131,11
7.		4,93	2,19	20,08	1087,45
8.		4,83	1,99	21,03	959,47
9.		4,46	3,99	19,54	955,71
10.		4,60	2,82	19,73	848,69
11.		4,69	1,31	40,98	829,84
12.		4,90	2,37	16,47	821,01
13.		4,58	2,36	17,59	811,57
14.		4,55	1,19	23,68	798,87
15.		4,46	1,63	13,16	680,54
16.		4,52	2,39	17,40	657,54
17.		3,59	2,00	20,00	576,00
18.	Средняя (V от 50 до 500 мм ³)	3,68	1,85	18,71	479,80
19.		3,07	1,66	48,91	428,24
20.		3,53	1,68	22,55	402,67
21.		3,63	1,33	11,47	391,98
22.		3,37	1,05	20,72	374,04
23.		3,73	1,62	9,76	368,86
24.		3,70	1,91	13,37	365,59
25.		3,22	2,01	9,85	306,27
26.		3,09	2,55	15,94	302,44
27.		3,15	1,85	18,35	301,42
28.		3,31	1,63	15,20	296,35
29.		3,19	1,08	12,64	266,19
30.		3,10	1,76	12,74	263,09
31.		2,63	1,59	17,66	210,1
32.		2,60	2,49	14,02	199,66
33.		2,54	1,92	15,99	190,00
34.		2,65	1,80	13,88	188,56
35.		2,51	2,42	10,53	186,88
36.		2,81	1,89	9,71	186,84

1	2	3	4	5	6
37.		2,44	1,24	14,51	183,93
38.		2,69	1,67	13,01	168,10
39.		2,49	2,40	12,22	153,12
40.		2,17	1,26	9,66	129,33
41.		2,31	1,92	10,90	118,80
42.		1,54	1,53	15,17	116,21
43.		2,29	1,77	10,45	114,62
44.		2,33	1,08	15,46	113,21
45.		2,27	1,21	10,33	98,48
46.		2,10	0,89	14,99	88,09
47.		1,78	1,26	9,44	86,84
48.		2,15	1,32	9,12	83,07
49.		2,00	1,58	10,25	78,77
50.		1,82	1,49	10,85	78,47
51.		2,21	1,05	4,98	73,72
52.		2,07	1,37	9,67	68,91
53.		1,70	0,89	8,28	64,55
54.		1,81	1,17	7,25	54,24
55.		1,72	0,90	7,77	53,83
56.		1,49	0,84	11,61	49,22
57.		1,94	1,01	7,15	49,18
58.		1,60	1,42	12,09	48,69
59.		1,69	1,11	7,19	48,14
60.		1,89	0,77	5,41	44,83
61.		1,65	0,86	7,18	43,45
62.		1,33	0,95	10,59	40,92
63.		1,57	1,15	6,32	40,90
64.		1,61	1,16	9,20	39,69
65.		1,52	1,06	6,88	38,59
66.		1,51	1,12	8,38	38,46
67.	Мелкая (V менее 50 мм ³)	1,35	1,28	5,83	33,06
68.		1,32	1,03	4,19	32,94
69.		1,42	0,75	8,62	31,79
70.		1,58	0,88	4,59	27,79
71.		1,49	1,07	4,47	27,47
72.		1,31	1,07	12,44	26,82
73.		1,32	1,29	8,65	25,73
74.		1,31	0,87	5,15	24,82
75.		1,28	0,80	6,74	24,10
76.		1,54	0,79	5,15	22,66
77.		1,56	0,55	4,79	22,02
78.		1,41	0,96	3,94	21,71

1	2	3	4	5	6
79.		1,41	0,80	6,24	21,39
80.		1,25	0,86	6,22	20,63
81.		1,13	0,10	5,34	17,83
82.		1,14	0,10	4,65	17,78
83.		1,28	0,90	3,33	16,33
84.		1,01	0,85	4,05	15,07
85.		1,14	0,58	3,78	12,63
86.		1,07	0,92	3,38	11,95
87.		1,02	0,88	3,42	11,37
88.		0,98	0,88	3,56	10,67
89.		1,02	0,74	5,85	9,75
90.		0,96	0,79	3,28	9,75
91.		1,11	0,92	5,52	9,73
92.		1,05	0,58	3,41	9,60
93.		0,99	0,54	3,53	8,69
94.		0,97	0,58	2,79	7,55
95.		0,92	0,59	2,74	6,23
96.		0,90	0,60	2,70	6,10
97.		0,85	0,80	2,01	5,72
98.		0,81	0,54	2,70	4,95
99.		0,81	0,53	2,60	4,68
100.		0,80	0,53	2,58	4,24

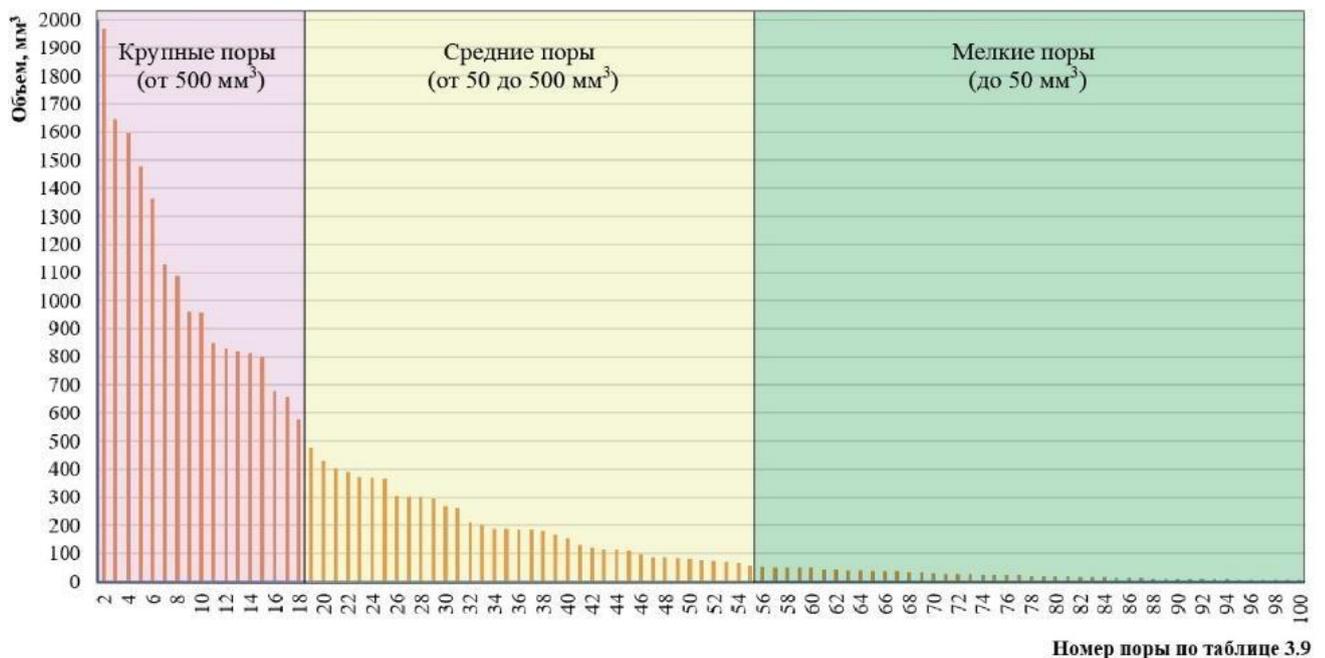


Рисунок 3.26 – Распределение пор воздухововлечения по объему

Рассмотрен газовый пузырек радиусом $R_0 = 10$ мм в ячеистобетонной смеси.

Пусть в начальный момент времени после заливки смеси в форму пузырек

гипотетически имеет сферический вид и расположен на глубине $L = 100$ мм от поверхности смеси (рисунок 3.27, *a*).

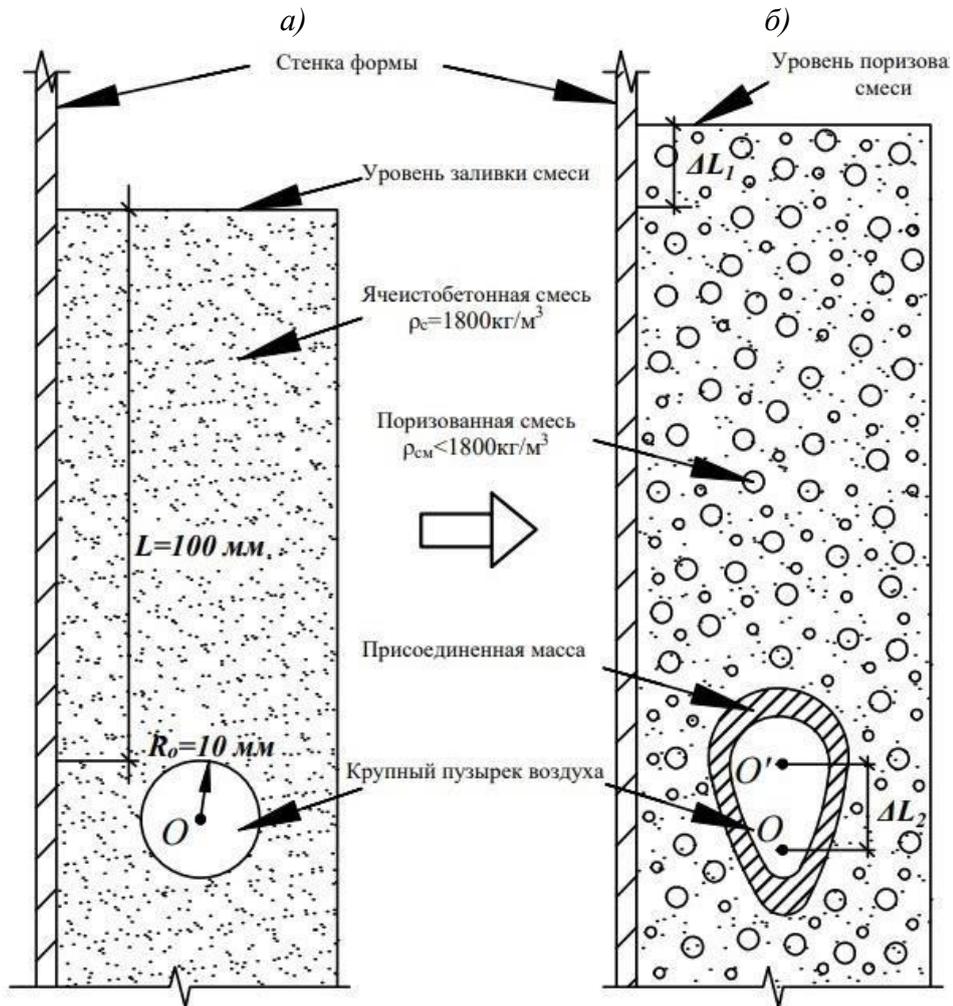


Рисунок 3.27 – Схема преобразования формы пор воздухововлечения в ячеистобетонной смеси: *a* – гипотетический начальный момент; *b* – энергетически предпочтительное состояние

Потенциальная энергия газового пузырька обуславливает выталкивающую силу из-за различий плотностей воздуха ($\rho_v = 1,29$ кг/м³) и смеси ($\rho_c = 1800$ кг/м³).

Так как $\rho_c \gg \rho_v$, архимедова сила:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho_c. \quad (3.5)$$

Предположим, что рассматриваемая пора воздухововлечения сместится со своего первоначального положения к уровню заливки смеси, преодолев расстояние L . Смещение поры воздухововлечения с глубины к поверхности уменьшит потенциальную энергию пузырька:

$$\Delta E_a = -\frac{100}{3} \pi R_0^3 \rho_c g L \quad (3.6)$$

Величина границы раздела фаз между смесью и воздухом в пузырьке определяется площадью поверхности пузырька. Поверхность раздела фаз дает вклад в потенциальную энергию пузырька:

$$E_\phi = \sigma \cdot S, \quad (3.7)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз воздух – ячеистобетонная смесь, энергия единицы площади, поверхности; S – площадь поверхности.

Кривизна поверхности вносит вклад в энергию пор воздухововлечения за счет избыточного давления у искривленной поверхности. Лапласовское давление в поре воздухововлечения определяется по формуле:

$$P_l = \frac{2\sigma}{R_0}. \quad (3.8)$$

Произведем количественную оценку каждого из трех рассмотренных составляющих в энергетический потенциал поры воздухововлечения в ячеистобетонной смеси:

1. Вклад в энергию за счет кривизны поверхности. Взяв для жидкой фазы ячеистобетонной смеси как для воды $\sigma = 72,75$ мДж/м² для поры воздухововлечения с $R_0 = 10$ мм по формуле (3.8) получим давление Лапласа 14,55 Па. Эта величина на четыре порядка ниже атмосферного давления $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па. Когда $P_0 \gg P_l$, внешнее атмосферное давление значительно выше лапласовского давления в пузырьке, пора воздухововлечения чувствительна к любому внешнему изменению давления и является по Я.Е. Гегузину [204] «мягкой». Энергетический потенциал поры воздухововлечения за счет кривизны поверхности незначительный.

2. Потенциальная энергия за счет межфазной границы определена по формуле (3.7):

$$E_\phi = 72,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (10^{-2})^2 = 9,14 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

3. Энергия пузырька за счет выталкивающей силы рассчитана по формуле (3.6):

$$\Delta E_a = -\frac{4 \cdot 3,14 \cdot (10^{-2})^3 \cdot 1800 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{3} = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Полученное значение на два порядка выше энергии за счет межфазной границы.

Следовательно, ключевым фактором, влияющим на энергетическое состояние газового пузырька в газобетоне, является его потенциальная энергия, которая определяется уровнем смеси ячеистого бетона над порой воздухововлечения.

Характеристики окружающей поры воздухововлечения среды и количество вещества в этой среде, измеряемое через присоединенную массу, оказывают существенное влияние на состояние поры воздухововлечения в газобетонной смеси. В традиционной теории присоединенная масса определяется как половина объема среды, вытесненной пузырьком, умноженная на плотность этой среды. Для сферического пузырька воздуха эту массу можно вычислить по формуле:

$$m_c = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho_0 \quad (3.9)$$

Для рассматриваемого пузырька с радиусом $R_0 = 0,01$ м присоединяемый объем равен $V_0 = 2,09 \text{ см}^3$ или $2,09 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. С учетом начальной плотности смеси $\rho_c = 1800 \text{ кг/м}^3$ присоединенная масса составит $3,77 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$.

На начальном этапе основной энергетической характеристикой, окружающей поры воздухововлечения среды, является температура ячеистобетонной смеси. Температура смеси при заливке равна $43 \text{ }^\circ\text{C}$. Приняв температуру воздуха в зоне заливки $25 \text{ }^\circ\text{C}$, получаем разность температур $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Наличие градиента температур предопределяет передачу энергии от среды к воздуху, находящемуся в пузырьке. Градиент одинаков по всей поверхности сферы и приводит к нагреву воздуха в поре воздухововлечения.

Определим количество энергии, необходимой для нагрева воздуха в рассматриваемом пузырьке на 1 °С. Так как воздух влажный, теплоемкость определяем по уравнению:

$$C_p = 1005 + 1865 \cdot d, \quad (3.10)$$

где 1005 Дж/кг·°С – удельная теплоемкость сухого воздуха при 25 °С; 1865 Дж/кг·°С – удельная теплоемкость водяного пара; d – абсолютная влажность, кг водяного пара на кг сухого воздуха.

Содержание водяных паров в сухом воздухе принято 15 г. Масса сухого воздуха в поре воздухововлечения с $R_0 = 0,01$ м составит $[4,19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3] \cdot [1,29 \text{ кг/м}^3] = 5,4 \cdot 10^{-6}$ кг. Теплоемкость влажного воздуха в поре воздухововлечения: $1005 + 1865 \cdot 0,015 = 1033$ Дж/кг·°С. Энергия для градиента температуры в 1 °С для поры воздухововлечения составит: $1033 \cdot 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 5,58 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Для газобетонной смеси D500 объемная теплоемкость составляет $1,237 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С. Для присоединенного к поре воздухововлечения с $R_0 = 10$ мм объема газобетонной смеси, равного $2,09 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С энергия при градиенте температуры в 1 °С: $1,237 \cdot 10^6 \cdot 2,09 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 2,59$ Дж.

Следовательно, передача энергии от присоединенной массы поры воздухововлечения при изменении температуры газобетонной смеси на 1 °С с 43 до 44 °С достаточна, чтобы нагреть воздух в поре практически до 1000 °С.

Уже на момент контакта пор воздухововлечения с окружающей его горячей газобетонной смесью пузырек с воздухом подвержен мощному энергетическому воздействию со стороны окружающей его среды. В таких условиях пора воздухововлечения примет энергетический статус, соответствующий минимуму его потенциальной энергии. Это форма перевернутой капли (рисунок 3.28).

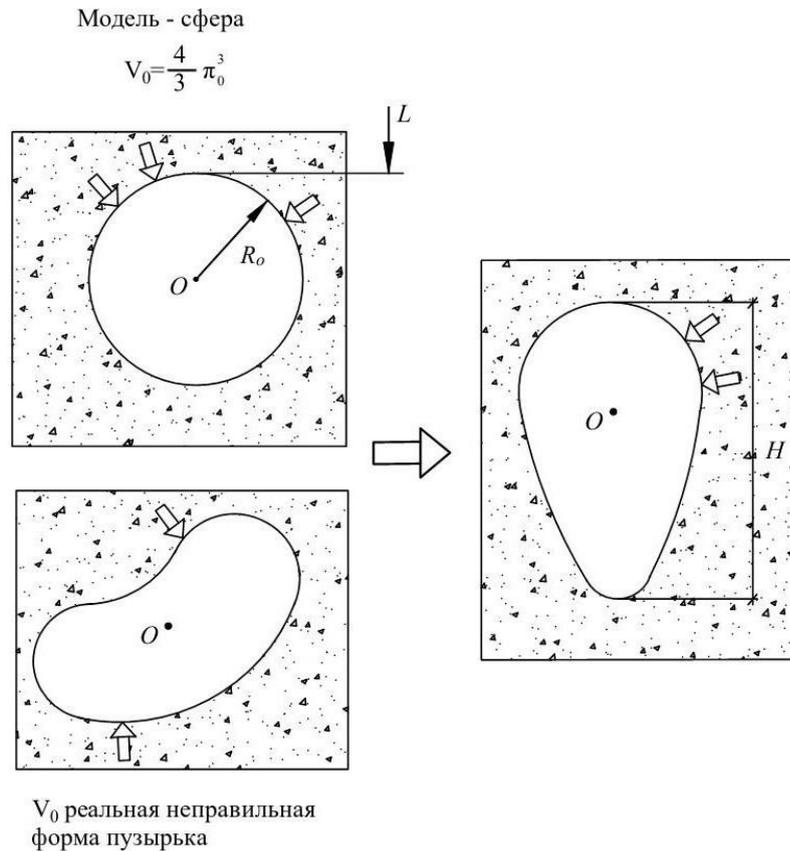


Рисунок 3.28 – Схема трансформации формы пузырька вовлеченного воздуха в пору воздухововлечения с формой перевернутой капли

Занимающие значительную часть пространства в ячеистых бетонах поры оказывают влияние на строительно-технические свойства газобетона, в том числе теплоизоляционные. Поры воздухововлечения являются дефектами структуры газобетона и влияют на снижение его прочности и долговечности. Для улучшения качества газобетона и предотвращения образования пор воздухововлечения, необходимо оптимизировать технологии производства и контролировать процесс заливки.

Изучение пористой структуры и выявление дефектов в порах газобетона представляет собой важный этап для повышения качества и надежности строительных конструкций. Определение дефектов позволяет не только улучшить технологию производства газобетона, но и разработать методы обнаружения и контроля этих дефектов на всех стадиях производства материалов. Углубленное понимание пористой структуры и ее дефектов открывает новые перспективы для создания более эффективных строительных материалов с повышенной устойчивостью и долговечностью.

3.5.2. Сегментные пузыри

Щелевые полости в теле ячеистого бетона образуются в процессе формирования пористой структуры (рисунок 3.29). Причиной этого являются смыкаемые сегментные пузыри [205].

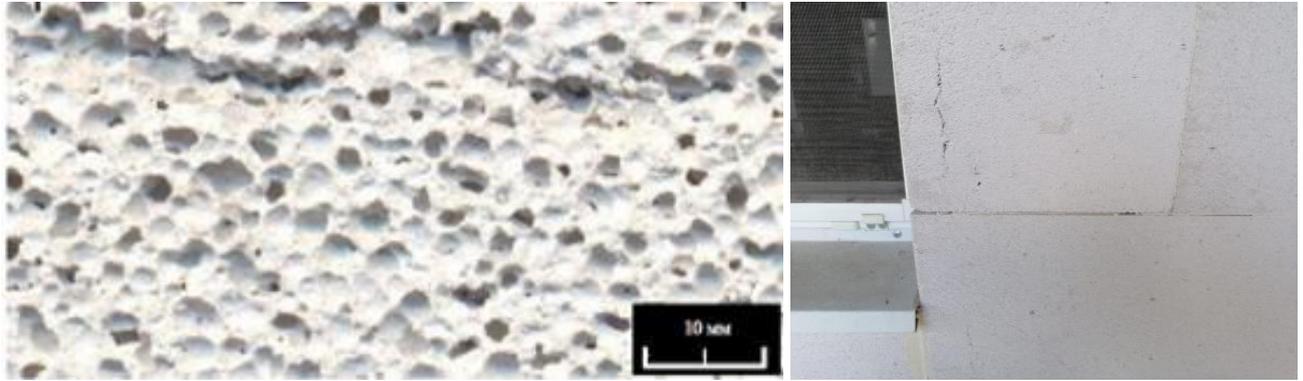


Рисунок 3.29 – Разрывы сплошности в газобетоне от сегментных пузырей

Изучены модельные системы процесса взаимодействия дисперсного алюминия с щелочной средой. Как правило, алюминий находится в виде агрегатов (рисунок 2.5), а первоначально выделяемые микронные пузырьки водорода коалесцируют и образуются миллиметровые водородные пузырьки (рисунок 3.30).

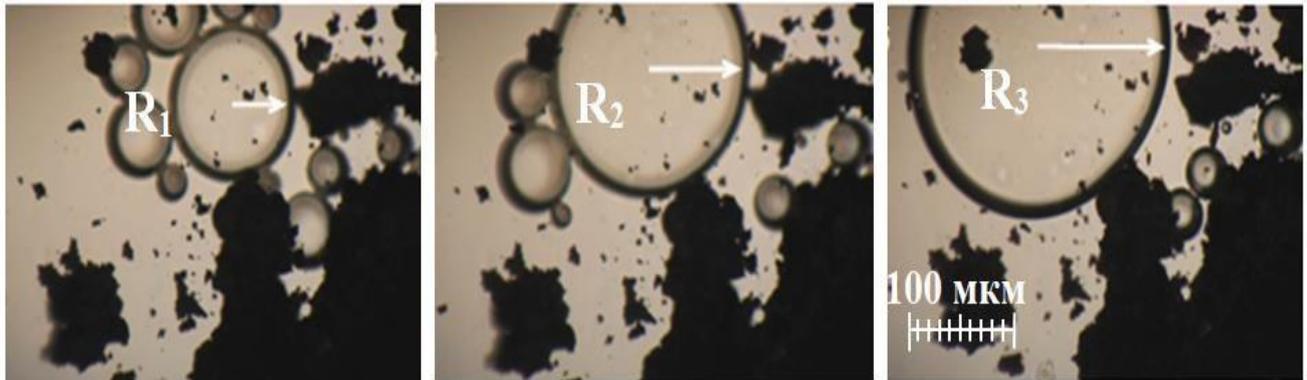


Рисунок 3.30 – Рост газового пузырька при коалесценции

Когда процесс коалесценции пузырьков водорода в ячеистобетонной смеси происходит у верхней поверхности вспученного массива, это может привести к формированию крупных пузырей. Инициатором коалесценции являются неоднородности в ячеистобетонной смеси, преимущественно в виде конгломератов извести. Представления о крупных пузырях развивали в [135, 205],

причем Д.А. Лабунцов назвал крупный газовый пузырь сегментным. Д.А. Лабунцов рассматривал идеализированную форму крупного пузыря газа в жидкости. Форма пузыря представлена им сферическим сегментом для сферы с радиусом R и телесным углом 2θ . Данная часть имеет вид плоскости, а высота сегмента и диаметр данной части предопределяется значениями R и θ .

Представления о сегментных порах по Д.А. Лабунцову [135] развиты исходя из особенностей ячеистобетонной смеси и результатов многочисленного тестирования массива в условиях реального производства.

В работах [206, 207] форму крупного сегментного пузыря предлагалось рассматривать сферическим сегментом радиуса R_c и данной части также в виде сегмента с радиусом R_θ при $R_\theta > R_c$. Оба сегмента соединяет округлая поверхность с очень малой величиной радиуса закругления $R_o \ll R_c < R_\theta$. Объем сегментных пузырей имеет величину более 2 см^3 .

Нами разработана теория сегментных пузырей в ячеистобетонной смеси. Сегментные пузыри в ячеистобетонной смеси предложено рассматривать в форме двояковыпуклой линзы с разными радиусами кривизны и с округлыми краями преимущественно разного радиуса закругления. На рисунке 3.31 приведено схематическое изображение сечения сегментного пузыря в ячеистобетонной смеси плоскостью, которая проходит через ось пузыря, совмещенную с осью ординат. Форму пузыря определяют четыре радиуса кривизны с условием $R_1 > R_2 \gg R_3 \gg R_4$ и телесные углы с θ_1 и θ_2 . Рост сегментного пузыря происходит за счет коалесценции функциональных пор, заполненных водородом, а также за счет перехода воды в парообразное состояние. Причиной образования сегментного пузыря являются макронеоднородности в ячеистобетонной смеси из-за присутствия конгломератов извести или алюминиевого газообразователя. Рост сегментного пузыря происходит за счет коалесценции функциональных пор, заполненных водородом, а также за счет перехода воды в парообразное состояние.

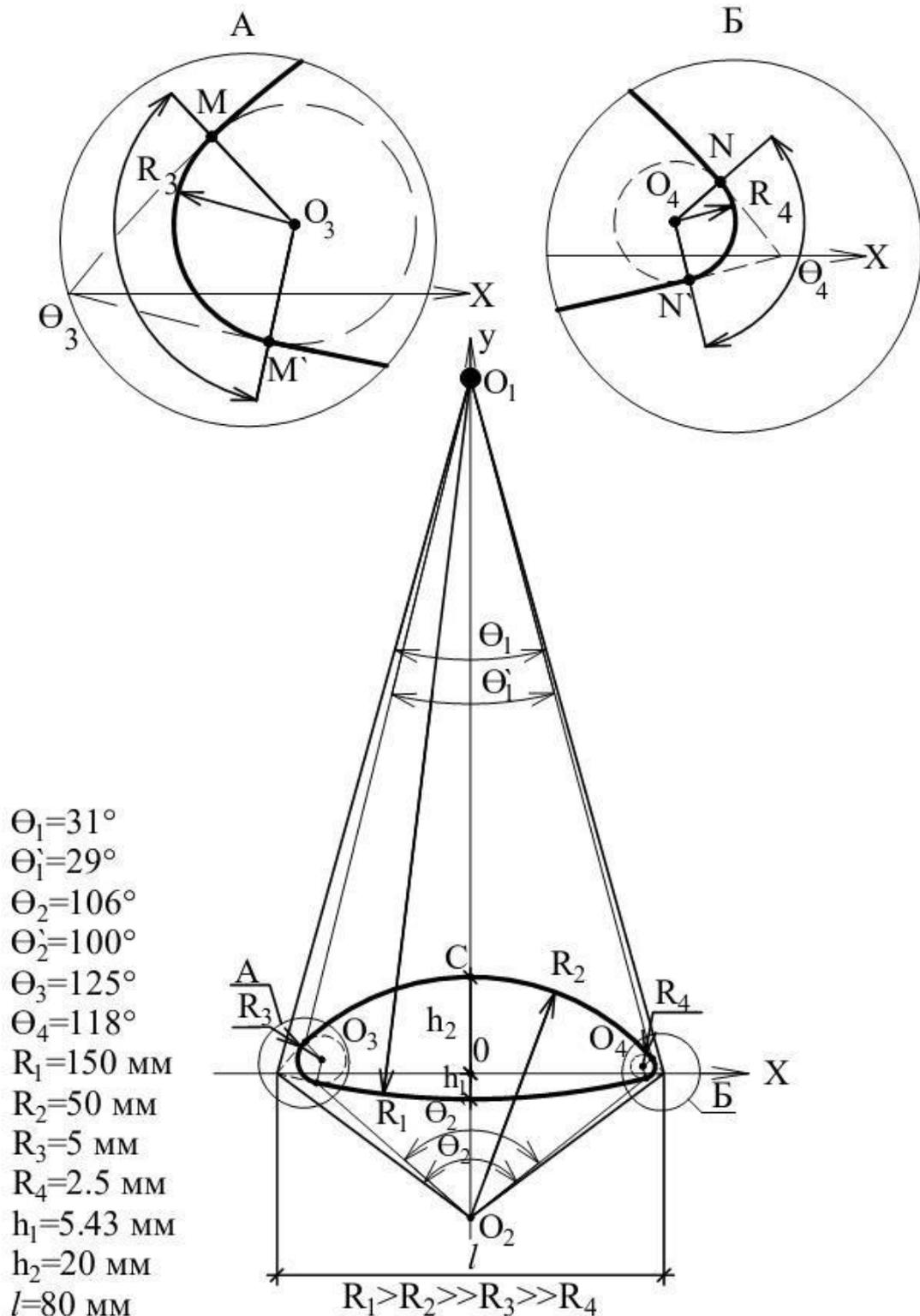


Рисунок 3.31 – Схема сегментного пузыря в ячеистобетонной смеси

На поверхности твердеющего массива к концу процесса газообразования через 0-15 мин с момента заливки ячеистобетонной смеси появляются вздутия высотой от 3 до 15 мм. Наблюдения за поверхностью массива показывают, что бугристость от вздутия остается неподвижной или может сделать от одного до нескольких

быстрых, непрогнозируемых по направлению перемещений на расстояние до 30 см от первоначального положения (рисунок 3.32)

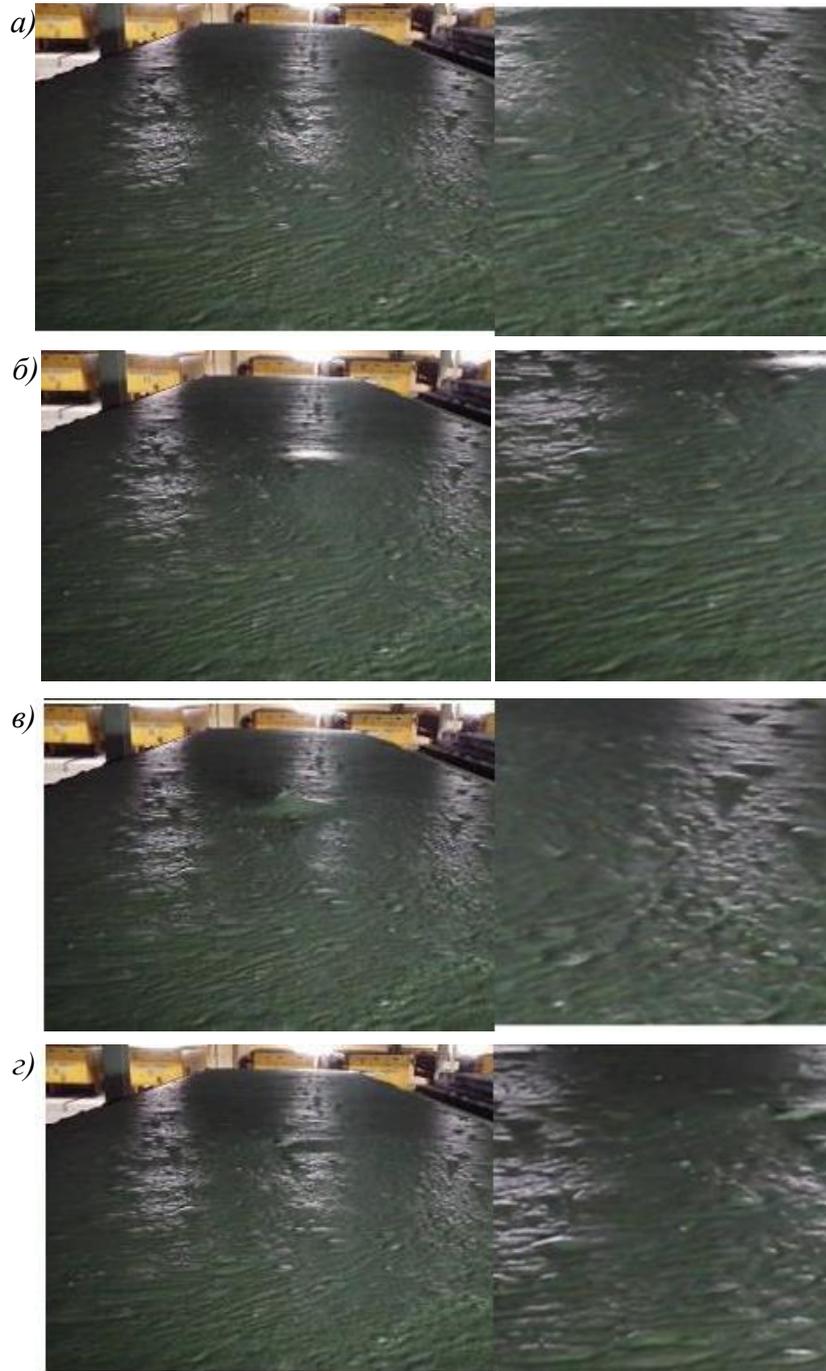


Рисунок 3.32 – Сегментный пузырь у поверхности газобетонного массива:
a-v – перемещения пузыря; *z* – выхлоп газа

Для выявления причины перемещений сегментного пузыря в твердеющей смеси ячеистого бетона построена эпюра тангенциальных напряжений от давления на искривленной поверхности пузыря.

Базовая фигура сегментного пузыря в виде сечения с $R_4 = 2,5$ мм представлена на рисунке 3.33. Пузырь имеет ассиметричный вид с $R_3 > R_4$. Силы, действующие на материальную точку u поверхности жидкой фазы, рассмотрены как тангенциальная \vec{F} и нормальная \vec{F}_n составляющие. Вектор тангенциальной силы направлен вдоль траектории движений параллельно оси X . Вектор \vec{F} совпадает с направлением вектора скорости и фактически определяет изменение энергии при перемещении сегментной полости в ячеистобетонной смеси.

Геометрически тангенциальные вектора по величине и направлению соответствуют синусу угла от точки C к оси X . Рассмотрим сферу с объемом, равным объему сегментного пузыря (рисунок 3.34). При установленном шаге перемещения точки в 10° для положительного и отрицательного направлений имеет место взаимная компенсация векторов. Это указывает на отсутствие оснований для горизонтального перемещения пузыря.

Симметрия синусоидальной кривой имеется и для эллипса с $R_1 = R_2 = 50$ мм и $R_3 = R_4 = 5$ мм (рисунок 3.35 и 3.36). В точках эллипса N и M меняется кривизна из-за уменьшения радиуса окружности в десять раз. В [207] особенность точек соприкосновения большей ($R = 50$ мм) и меньшей ($R = 5$ см) окружностей для эллипсной тригонометрической функции не рассматривали.

Уравнение синусоидальной кривой имеет вид:

$$\sin \alpha = \sin \alpha_n + \Delta_n \frac{R_{1(2)}}{R_{3(4)}}, \quad (3.11)$$

где $\sin \alpha$ – величина вектора при угле α ; $\sin \alpha_n$ – величина вектора до точки $N(M)$; Δ_n – приращение синуса угла после точки N при установленном шаге 10° ; $R_{1(2)}$ – радиус большей окружности, мм; $R_{3(4)}$ – радиус меньшей окружности, мм.

Данные в таблице 3.10 приведены в условных единицах (у.е.) исходя из того, что для окружности синусоиду строили для единичного вектора.

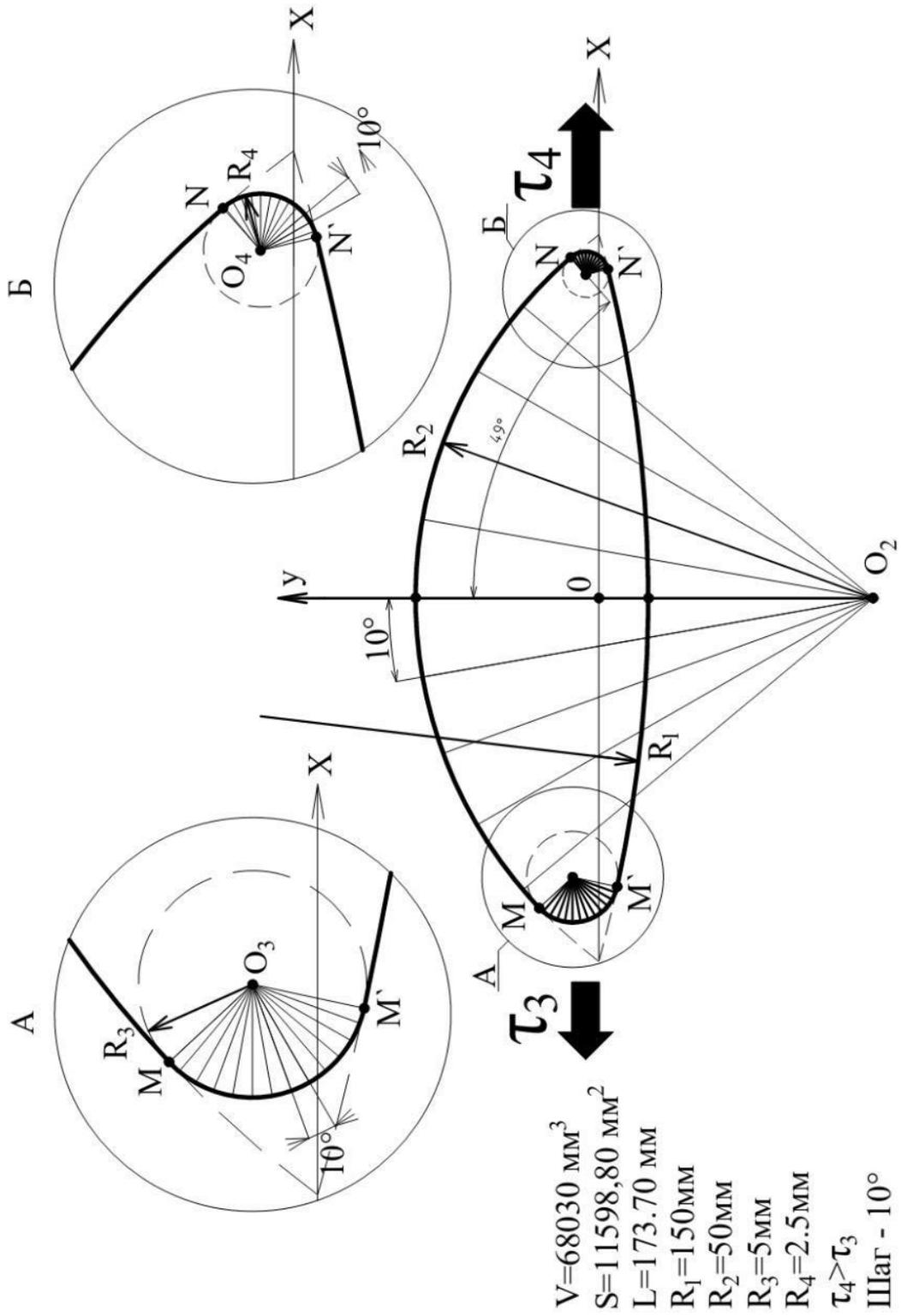
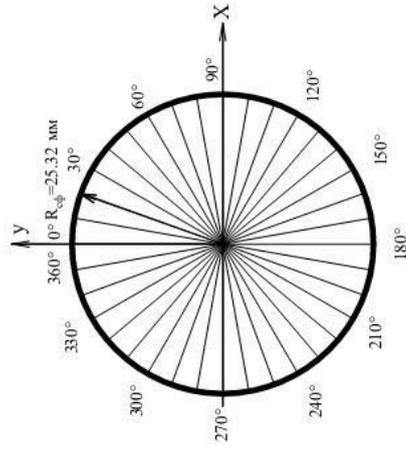
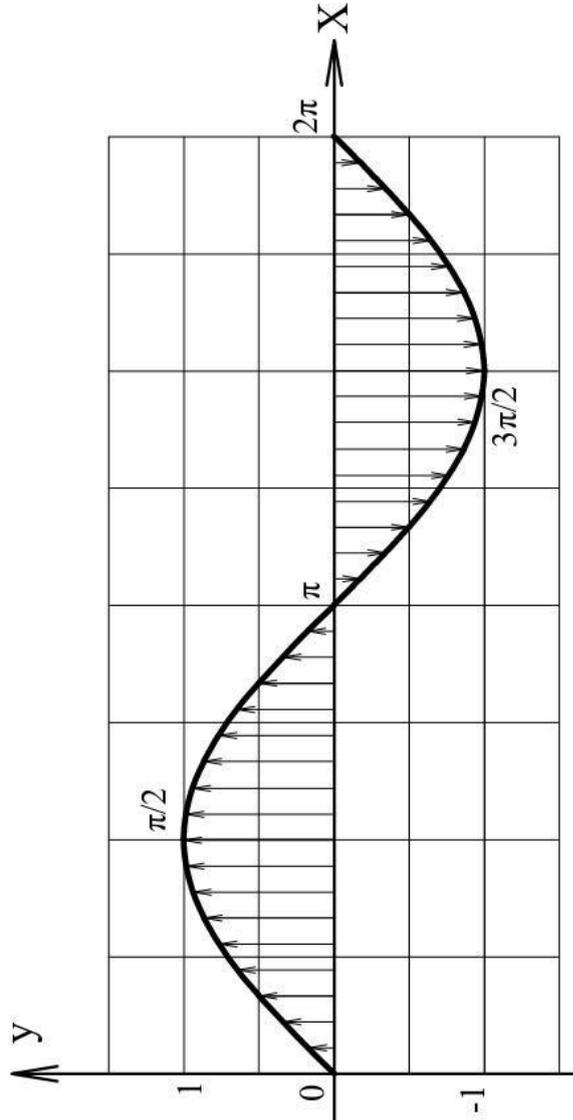


Рисунок 3.33 – Сечение сегментного пузыря с $R_f=2,5 \text{ мм}$

Окружность



Синусоида



$V = 68030 \text{ мм}^3$
 $S = 8056 \text{ мм}^2$
 $L = 159.47 \text{ мм}$
 $R_{\phi} = 25.32 \text{ мм}$
 Шаг - 10°

Рисунок 3.34 – Характеристики сечения эквивалентной по объему сферы

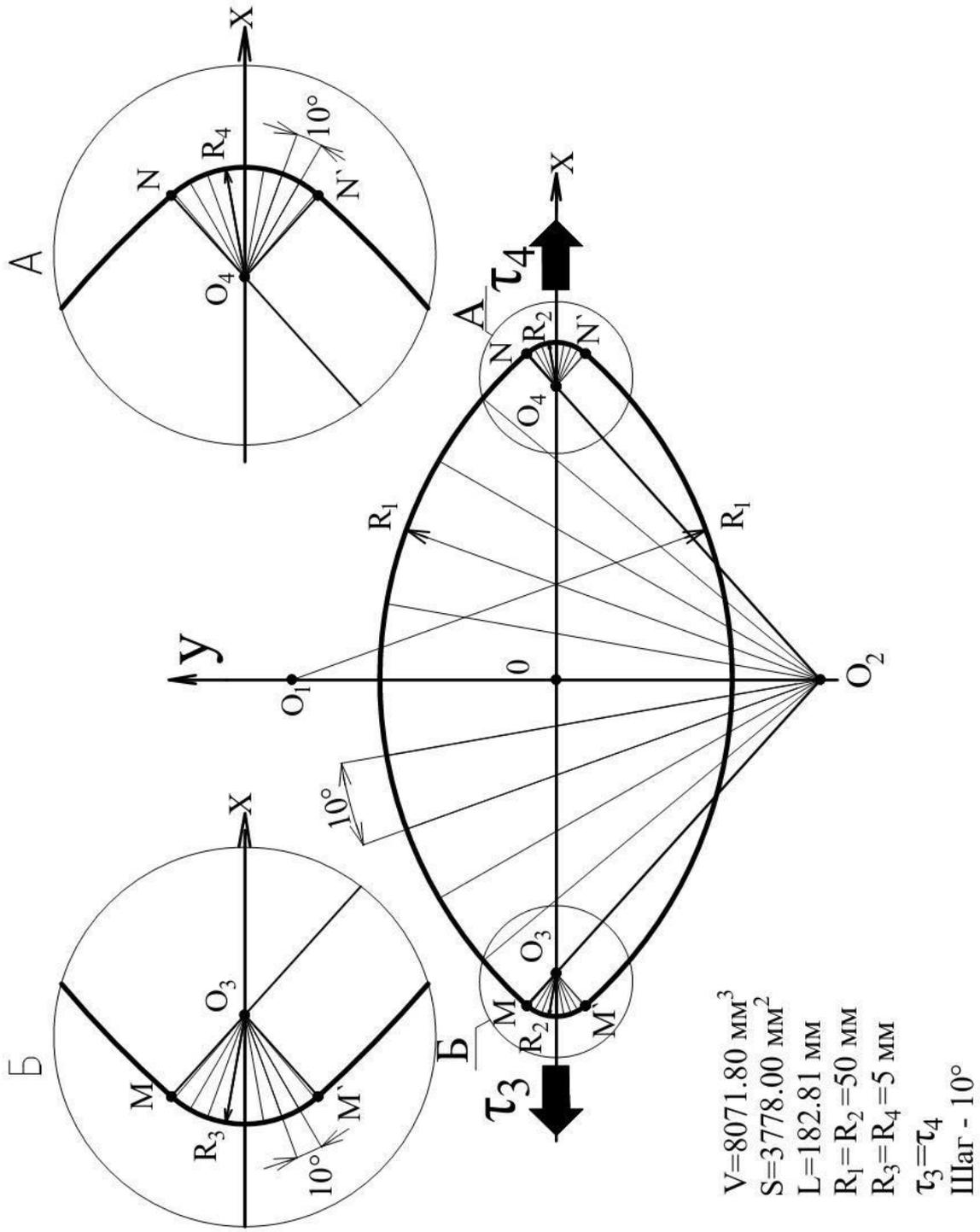


Рисунок 3.35 – Эллипс с $R_1 = R_2 = 50 \text{ мм}$, $R_3 = R_4 = 5 \text{ мм}$

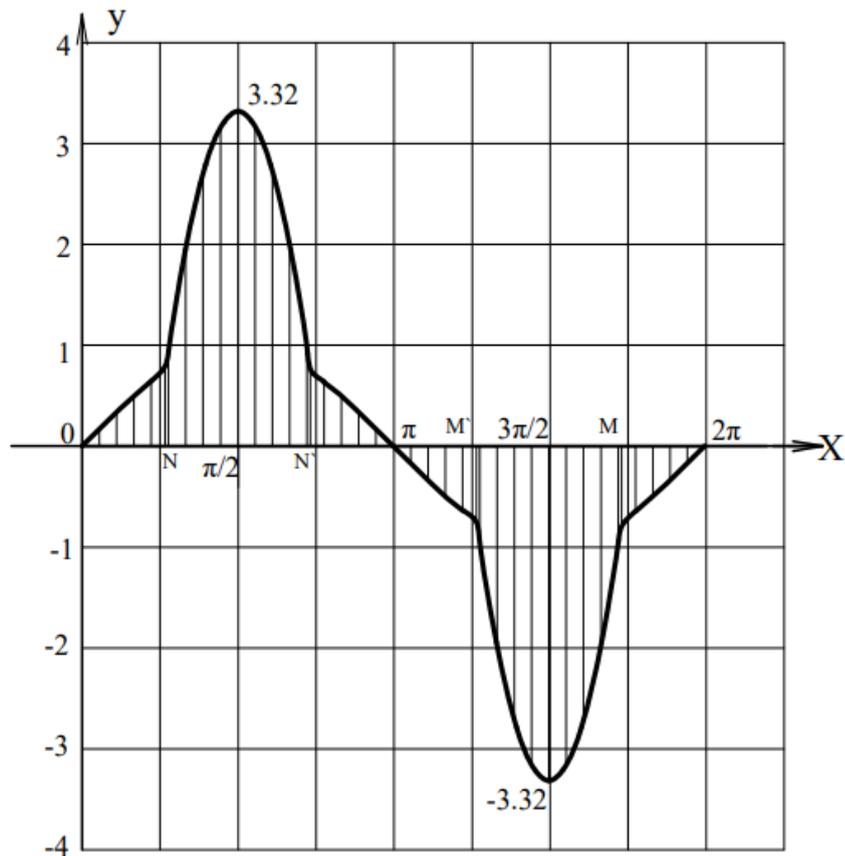


Рисунок 3.36 – Синусоидальная кривая эллипса с $R_1 = R_2 = 50$ мм $R_3 = R_4 = 5$ м

Таблица 3.10 – Характеристики синусоидальных кривых

№ п/п	Смещение, градус	Величина тангенциального вектора, условные единицы для фигуры				
		Окружность $R = 25,32$ мм	Эллипс $R_1 = R_2 = 50$ мм $R_3 = R_4 = 5$ мм	Сегментная фигура		
				$R_1 = 50$ мм $R_2 = 150$ мм $R_3 = 5$ мм $R_4 = 5$ мм	$R_1 = 50$ мм $R_2 = 150$ мм $R_3 = 5$ мм $R_4 = 2,5$ мм	$R_1 = 50$ мм $R_2 = 150$ мм $R_3 = 5$ мм $R_4 = 1$ мм
1	2	3	4	5	6	7
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	10	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3	20	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
4	30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
5	40	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
N	43	-	-	0,68	-	-
	48	-	0,74	-	-	-
	49	-	-	-	0,75	-
	51	-	-	-	-	0,78
6	50	0,77	0,97	1,52	0,98	0,77
7	60	0,87	1,97	2,52	2,98	5,22
8	70	0,94	2,71	3,71	4,45	8,90
9	80	0,98	3,16	3,86	5,36	11,16
10	90	1,00	3,32	3,71	5,66	11,92

1	2	3	4	5	6	7
11	100	0,98	3,16	3,26	5,36	11,16
12	110	0,94	2,71	2,52	4,45	8,90
13	120	0,87	1,97	1,52	2,98	5,22
14	250	-0,94	2,71	2,52	2,52	2,52
15	260	-0,98	3,16	3,71	3,71	3,71
16	270	-1,00	3,31	3,86	3,86	3,86
17	280	-0,98	3,16	3,71	3,71	3,71
18	290	-0,94	2,71	3,26	3,26	3,26
19	300	-0,87	1,97	2,52	2,52	2,52
20	310	-0,77	0,97	1,52	1,52	1,52
М	312	-	-0,74	-	-	-
	317	-	-	-0,68	-0,68	-0,68
21	320	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64
22	330	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
23	340	-0,34	-0,34	-0,34	-0,34	-0,34
24	350	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17
25	360	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Для фигуры сегментного пузыря в виде эллипса точка N находится на расстоянии 48° от начала отсчета. Дальнейшее смещение по окружности с $R = 5$ мм приводит к экстремуму синусоидальной эллиптической функции до величины вектора 3.32 у.е. Такой результат для эллиптической синусоиды обусловлен увеличением кривизны поверхности.

Синусоидальная кривая для сечения сегментного пузыря с $R_4 = 5$ мм приведена на рисунке 3.37. При одинаковых боковых радиусах закругления синусоидальная функция симметрична относительно оси X (направления движения). Когда $R_3 = 5$ мм, а $R_4 = 2,5$ мм по краям сегментного пузыря возникает асимметричность с максимумом при $\frac{\pi}{2}$, равным 5,661 и минимумом при $\frac{3\pi}{2}$, равном -3,862 (рисунок 3.38). Центры закруглений в сечениях асимметричность сегментного пузыря смещены вверх от оси X, что повышает асимметричность фигуры.

На рисунке 3.39 представлены тангенциальные векторы для закруглений сегментного пузыря. При закруглении с $R_4 = 2,5$ мм имеется большее значение суммы векторов, чем у $R_3 = 5$ мм, и выше плотность распределения векторов по дуге в интервале $50-120^\circ$. Градиент тангенциальных сил является условием для горизонтального перемещения сегментного пузыря в ячеистобетонной смеси в

направлении повышенной асимметрии. Когда размер закругления в сечении пузыря справа снижается до 1 мм, величина тангенциальных векторов и плотность их распределения по дуге существенно возрастают (рисунок 3.40).

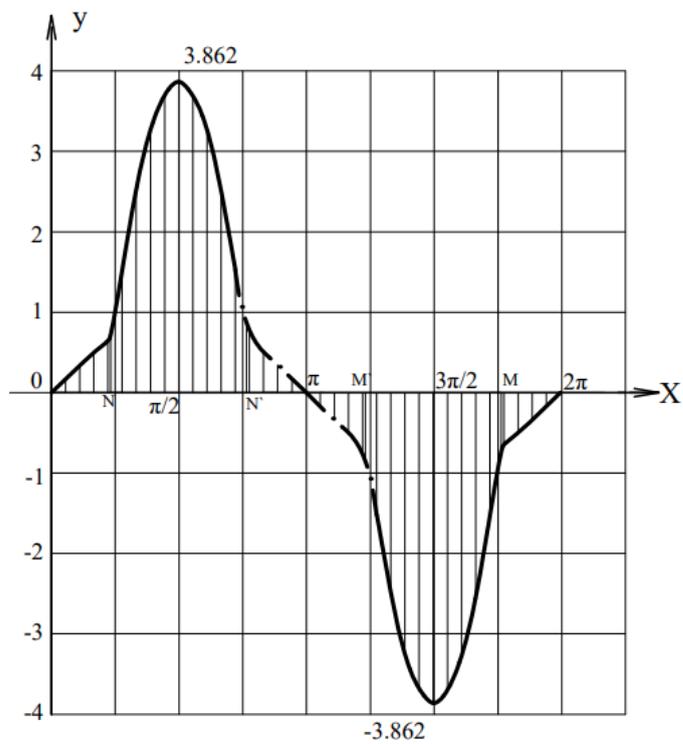


Рисунок 3.37 – Синусоидальная кривая сегментного пузыря с $R_3 = R_4 = 5$ мм

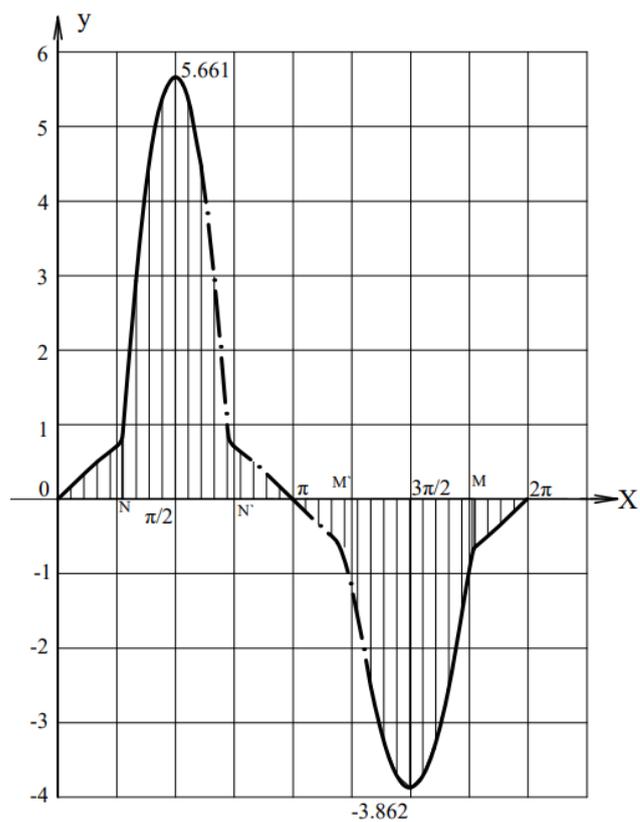


Рисунок 3.38 – Синусоидальная кривая сегментного пузыря с $R_3 = 5$ мм; $R_4 = 2,5$ мм

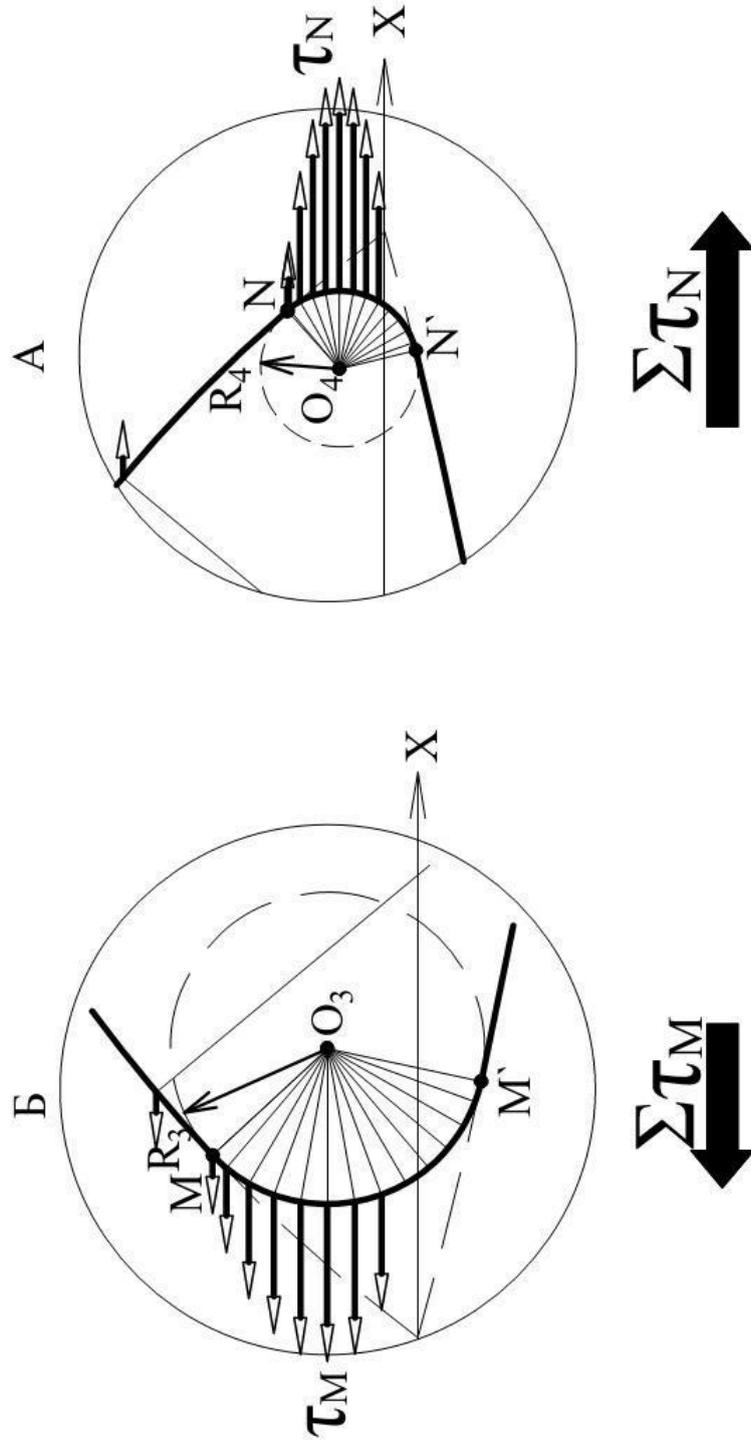


Рисунок 3.39 – Тангенциальные векторы для закруглений сегментного пузыря

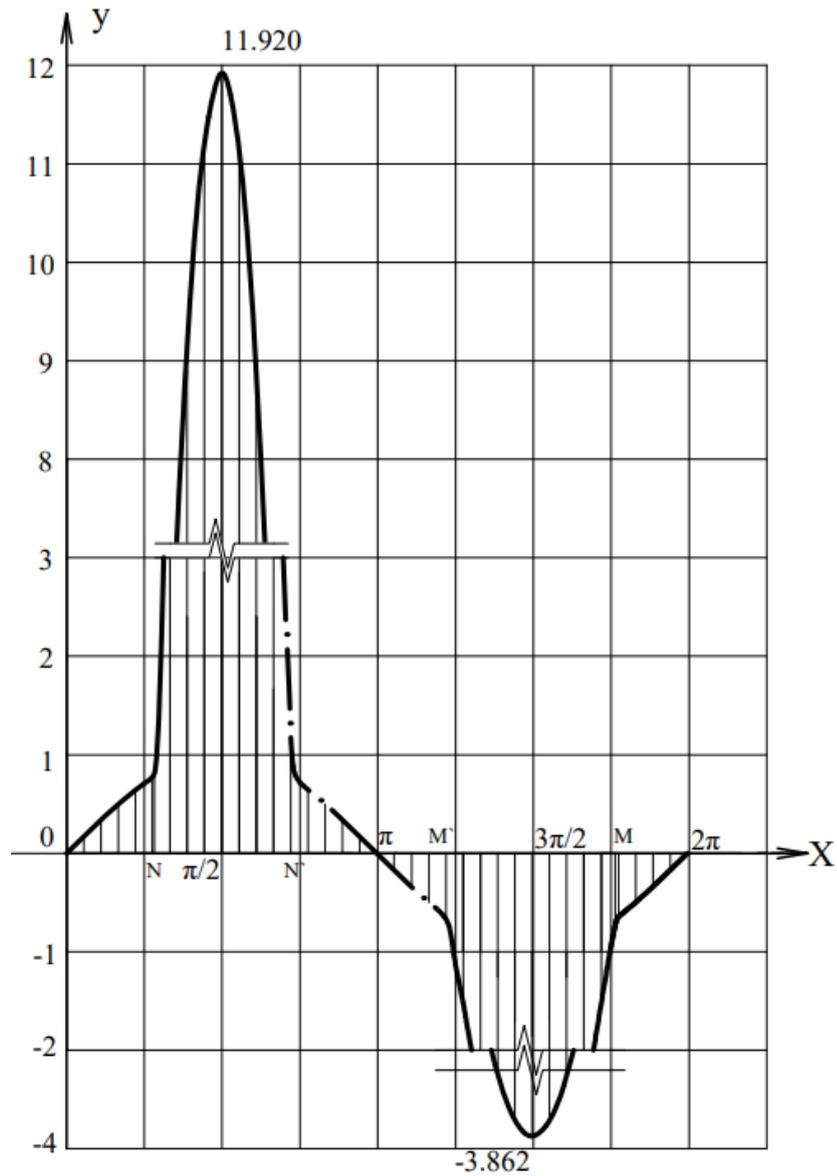


Рисунок 3.40 – Синусоидальная кривая сегментного пузыря с $R_3 = 5$ мм и $R_4 = 1$ мм

Следовательно, наблюдаемое на практике перемещение сегментного пузыря у поверхности ячеистобетонной смеси обусловлено асимметрией пузыря в области закругления. Уменьшение радиуса закругления и асимметрия сечения пузыря приводят к градиенту тангенциальных векторов и появлению силы, вызывающей направленное перемещение пузыря. Причиной возникновения асимметрии в строении фигуры сегментного пузыря являются локальные энергоёмкие процессы с участием конгломератов извести и дисперсного алюминия. При отсутствии асимметрии сегментный пузырь находится в метастабильном неподвижном состоянии.

3.6. Выводы

1. Развитие представлений о физико-химических закономерностях процессов, протекающих при производстве автоклавного ячеистого бетона, позволит создавать технологические решения по совершенствованию производства. Полученные данные о гидратообразовании в модельных газобетонных смесях на ранних этапах формирования структуры автоклавного ячеистого бетона позволяют формализовать химические реакции. Это дает возможность оценить теплофизические характеристики газобетонных смесей.

2. Полученные результаты по теплофизическим характеристикам газобетонных смесей позволяют дать оценку термического потенциала смесей за счет экзотермии реакции гидратообразования.

3. Газобетонная смесь за счет экзотермических процессов взаимодействия дисперсного алюминия, гидратации извести и начального твердения цемента имеет высокий термический потенциал с расчетным увеличением температуры смеси свыше 90 °С. Основной вклад в тепловыделение в смеси вносит оксид кальция. Значимыми показателями для теплового режима массива являются проектная марка по средней плотности, расход извести и водотвердое отношение. Расход тепла газобетонной смеси на нагрев формы и окружающей среды является негативным фактором, создающим термический градиент в массиве и связанные с этим напряжения. Использование энергетического потенциала газобетонных смесей позволит увеличить производительность технологической линии, снизить расход вяжущего за счет положительного эффекта на прочностные характеристики газобетона. Управление теплофизическими характеристиками позволит повышать качество выпускаемой продукции.

4. Характер формирования пор или пузырьков, находящихся между крупными – сохраняется. Во внутрь идет кристаллизация. Жесткие поры – это проявление свойств аналогичных твердым частицам. Частицу цемента или пузырек размера

менее 20 мкм не различить, а если взять больше пузырьков, то есть возможность экономии цемента.

5. Перспективой технологии ячеистого бетона является снижение максимального и среднего размера пор для выделенных областей мембранных и ячеистых газовых пор. Уменьшение размера пузырьков в твердеющей системе отразится на снижении числа Бонда и повысит значимость капиллярных сил в формировании поровой структуры ячеистого бетона. Перспективой технологии ячеистого бетона является снижение максимального и среднего размера пор для выделенных областей мембранных и ячеистых газовых пор. Уменьшение размера пузырьков в твердеющей системе отразится на снижении числа Бонда и повысит значимость капиллярных сил в формировании поровой структуры ячеистого бетона.

6. Поры – основной структурный элемент газобетона. Размер пор и происхождение пористости оказывают существенное влияние на свойства всех видов бетона гидратационного твердения. Создавая пористую структуру в процессе производства, изготавливают высокоэффективные материалы из ячеистого бетона.

7. Поры воздухововлечения выделены в структуре газобетона в отдельный вид. Они представляют собой пространственные полости, размер которых колеблется от 2 до 30 мм и образуется в процессе заливки газобетонной смеси в формы. Эти поры являются дефектами структуры материала, и их формирование связано с технологическими процессами и условиями производства.

8. Крупные поры воздухововлечения являются существенными дефектами в структуре ячеистого бетона, исключение которых имеет критическое значение. Формирование таких пор приводит к нарушению целостности и равномерности внутренней структуры материала, что снижает его прочность и теплоизоляционные свойства. Поэтому важно избегать образования крупных пор воздухововлечения в процессе производства ячеистого бетона.

9. Сегментные поры (пузыри) в ячеистобетонной смеси нами предлагается рассматривать в форме двояковыпуклой линзы с разными радиусами кривизны и с округлыми краями преимущественно разного радиуса закругления. Для выявления причины перемещений сегментного пузыря в твердеющей смеси ячеистого бетона построена эпюра тангенциальных напряжений от давления на искривленной поверхности пузыря.

10. Наблюдаемое на практике перемещение сегментного пузыря у поверхности ячеистобетонной смеси обусловлено асимметрией пузыря в области закругления. Уменьшение радиуса закругления и асимметрия сечения пузыря приводят к градиенту тангенциальных векторов и появлению силы, вызывающей направленное перемещение пузыря. Причиной возникновения асимметрии в строении поверхности сегментного пузыря являются локальные энергоемкие процессы с участием конгломератов извести и дисперсного алюминия. При отсутствии асимметрии сегментный пузырь находится в метастабильном неподвижном состоянии.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ГАЗОБЕТОННОГО МАССИВА

Гидратация вяжущих материалов представляет собой экзотермический процесс, который вызывает выделение тепла на ранних стадиях твердения. В результате этого твердеющий бетон подвергается нагреву. Увеличение температуры в начальной фазе твердения может иметь как положительные, так и отрицательные последствия. Положительный эффект заключается в ускорении процессов гидратации вяжущего и улучшении формирования физико-механических свойств материала. Однако твердение крупных бетонных массивов может приводить к значительному повышению температуры внутри массива, что, в свою очередь, способно вызывать значительные термические напряжения.

Особое внимание следует уделить тепловыделению в ячеистых бетонах, где основным объемным компонентом является воздух, обладающий теплоизолирующими свойствами, а сама система характеризуется низкой теплоемкостью. В связи с этим основная часть тепла, выделяющегося при гидратации вяжущего, направляется на нагрев твердых компонентов системы, которые в современных ячеистых бетонах занимают объем от 15 до 25 %. Закономерности термических явлений в смесях ячеистого бетона до конца не изучены.

4.1. Термические явления в газобетонном массиве

4.1.1. Экзотермия процессов

Экзотермические процессы были исследованы в модельных системах (п. 3.1). В ходе экспериментов проводились измерения температуры на начальном этапе гидратации с использованием специально разработанной термоизолированной ячейки (рисунок 2.2). Результаты измерения температуры в модельных смесях представлены на рисунке 4.1.

Повышение температуры, наблюдаемое в процессе гидратации, в значительной степени связано с двумя экзотермическими реакциями: гидратацией извести и окислительно-восстановительным взаимодействием дисперсного алюминия. Введение гипса в состав смешанного известково-цементного вяжущего или его добавление в качестве добавки способствует замедлению роста температуры смеси.

Таким образом, гипс играет значительную роль в технологии автоклавного ячеистого бетона, замедляя начальные реакции гидратообразования и способствуя синтезу преимущественно АFm-фаз в виде твердых растворов, которые участвуют в формировании структуры массива.

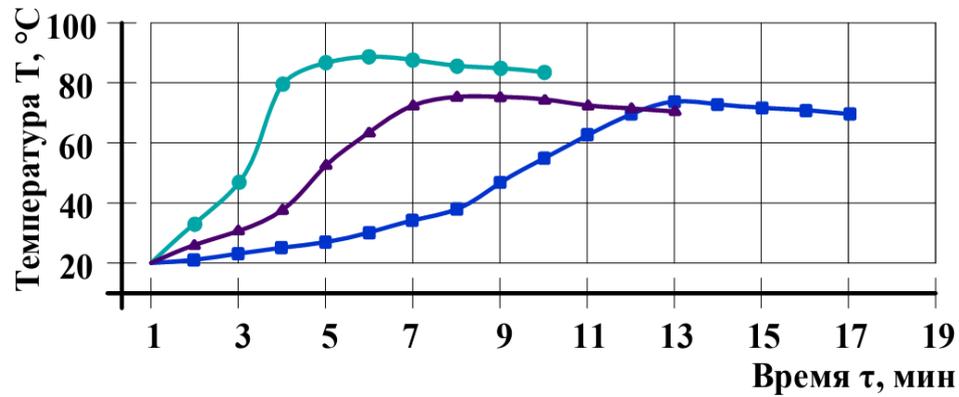


Рисунок 4.1 – Температура в модельных смесях: ● – система «Известь – Алюминий – Вода»; ▲ – система «Известь – Алюминий – Цемент – Вода»; ■ – система «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода»

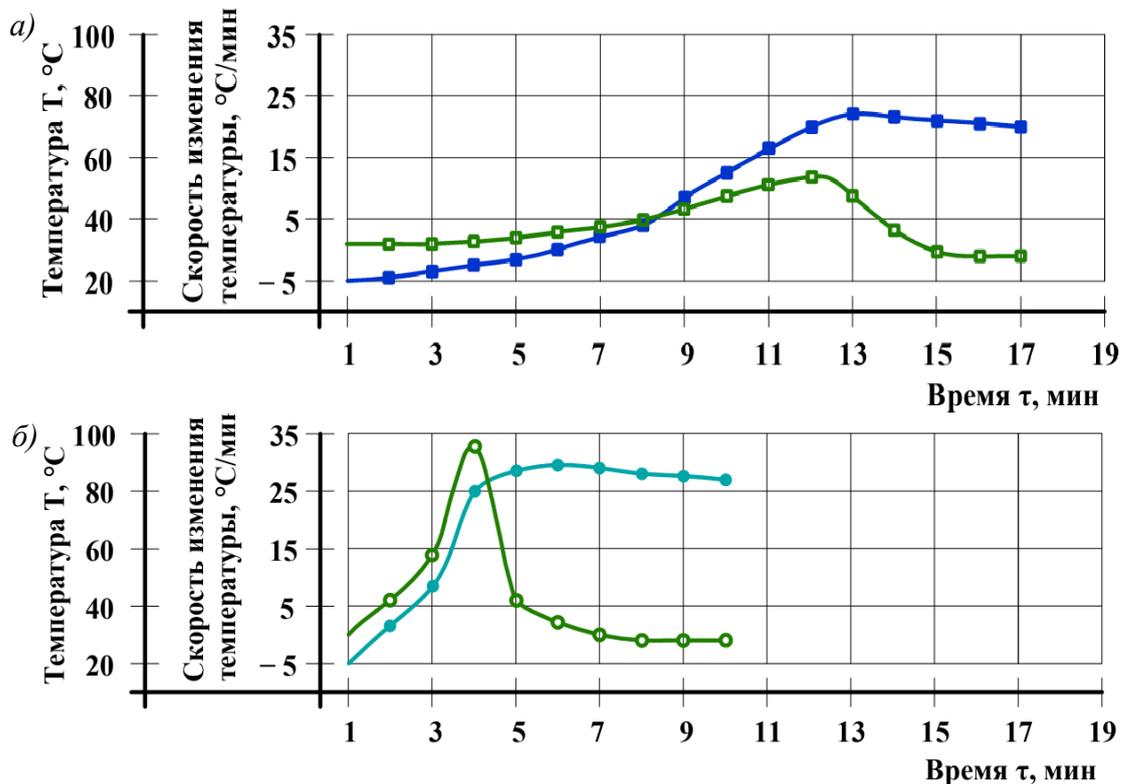


Рисунок 4.2 – Динамика температур в смесях модельных систем: а – система «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода»; ■ – скорость изменения температуры; ■ – изменение температуры; б – система «Известь – Алюминий – Вода»; ■ – скорость изменения температуры; ■ – изменение температуры

В системе «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода» (рисунок 4.2, а), наблюдается замедление скорости роста температуры по сравнению с системой, в

которой гипс отсутствует. Введение в смесь гипса замедляет основную экзотермическую реакцию гидратации извести, что позволяет избежать резкого роста температуры. В системе «Известь – Алюминий – Вода» (рисунок 4.2, б) наблюдается высокая скорость повышения температуры. Экзотермические реакции взаимодействия Al и гидратации CaO происходят одновременно, что подчеркивает значимость гипса в регулировании интегрального и дифференциального тепловыделения в системе.

Исследование термического состояния в ячеистобетонной смеси основывалось на результатах, полученных в модельных системах. На процессы, протекающие в массиве, существенное влияние оказывает масштабный фактор и поризация смеси при формировании функциональной пористости за счет водорода.

Замеры температуры в ядре газобетонного массива и одновременно высоты растущего массива приведены на рисунке 4.3.

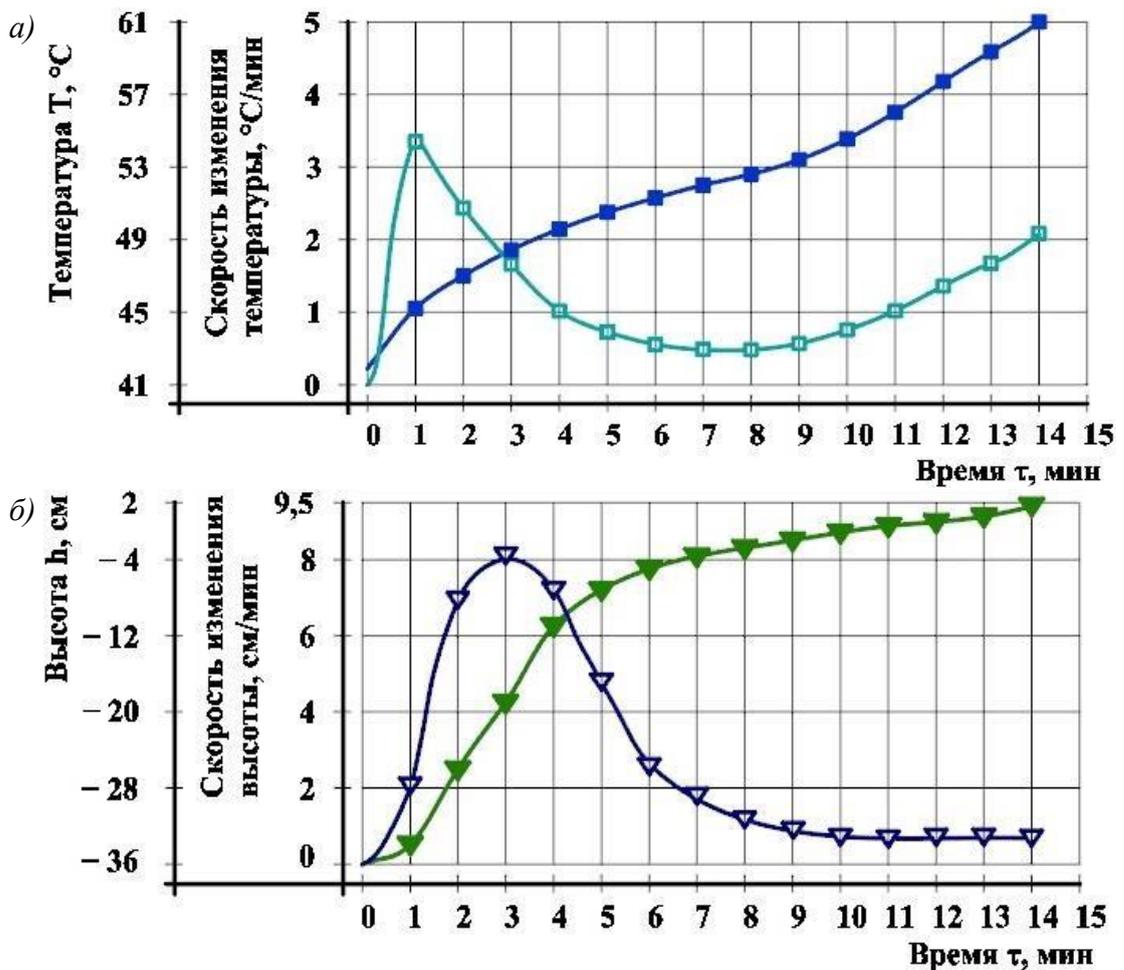


рисунок 4.3 – Температура (а) и высота (б) растущего массива: ■ – скорость изменения температуры; ■ – изменение температуры внутри массива; ■ – скорость изменения высоты; ■ – изменение высоты массива

Гипс, вводимый в смесь заводского изготовления, как и было установлено в модельных смесях, замедляет гидратацию извести, смещая начало процесса до 7-9 мин.

В ячеистобетонной смеси происходит разделение двух термических процессов, четко фиксируемых на дифференциальной температурной кривой: гидратообразования с алюминием и оксидом кальция. Скорость роста массива имеет двухминутную задержку от скорости реакции газообразования. Формирование пористости массива, фиксируемое по его высоте, задерживается к началу процесса гидратации извести.

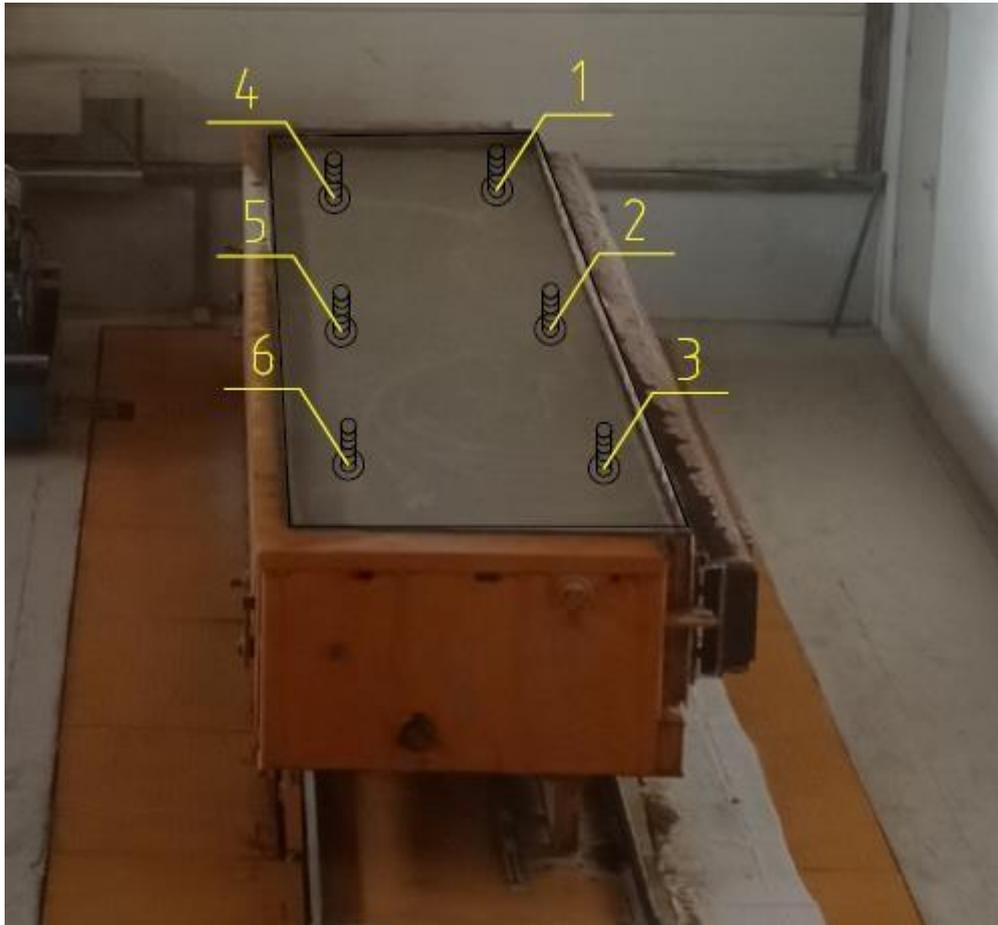
Следовательно, экзотермические процессы играют важную роль в формировании структуры ячеистых бетонов, что подчеркивает необходимость контроля температуры и градиента температур в массиве для достижения оптимальных физических и механических свойств конечных изделий. Понимание этих процессов не только способствует улучшению технологии производства ячеистых бетонов, но и минимизирует риски, связанные с термическими напряжениями в массиве.

4.1.2. Оптимизация температурного режима твердения массива

Принципиальным вопросом на стадии образования структуры массива является динамика роста температуры в ячеистобетонной смеси и массиве. Оценен энергетический потенциал [200] газобетонных смесей, который позволил прогнозировать температуру в ячеистобетонной смеси за счет экзотермических реакций. Полученные расчетные значения приращения в смеси температур, приведенные на рисунке 3.5, соответствуют известным представлениям [158] о характере изменения температур в ячеистобетонном массиве в процессе выдержки в доавтоклавный период.

Экспериментальная оценка температур в смеси, на поверхности и внутри массива производилась с момента заливки смеси в форму и до отправки массива к автоклавам. Схема установки термодатчиков для определения температур на поверхности массива представлена на рисунке 4.4.

а)



б)

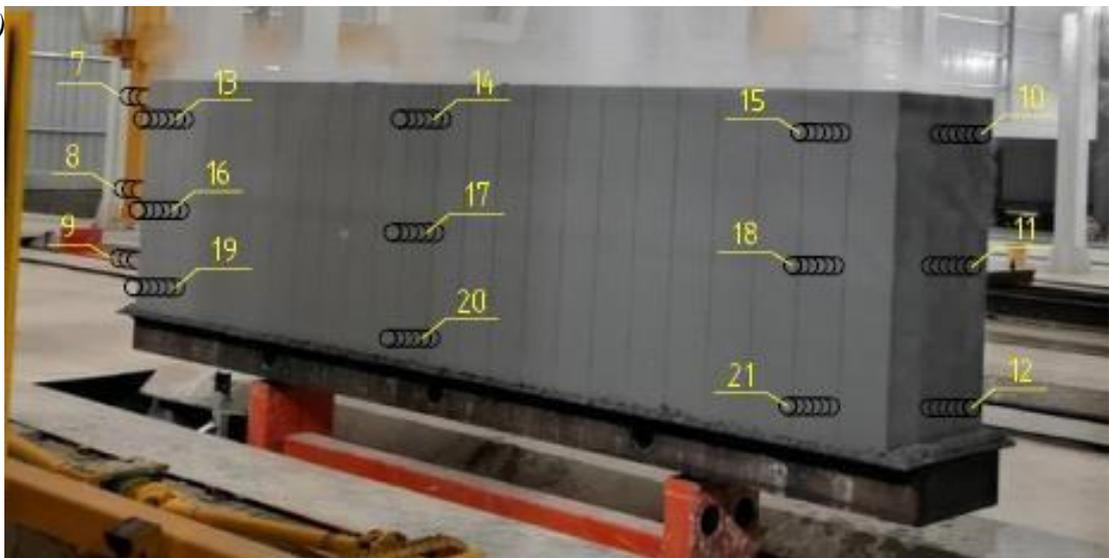
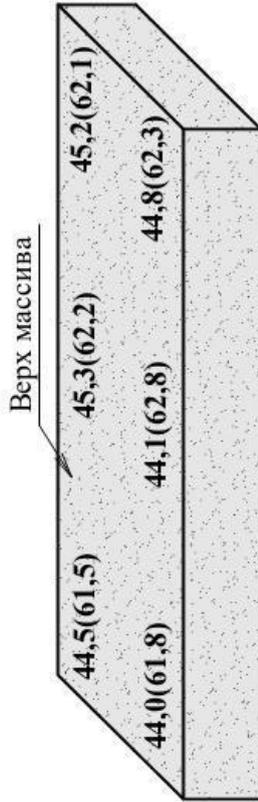


Рисунок 4.4 – Схема расположения температурных датчиков на поверхности массива:
а – в форме; *б* – после резки

На рисунке 4.5 приведены температуры на поверхности массива через 15 мин с момента заливки и далее через 1 ч 55 мин и 2 ч. В скобках даны температуры на глубине 12 см.

С УКРЫТИЕМ

В зоне выдержки
Через 15 мин

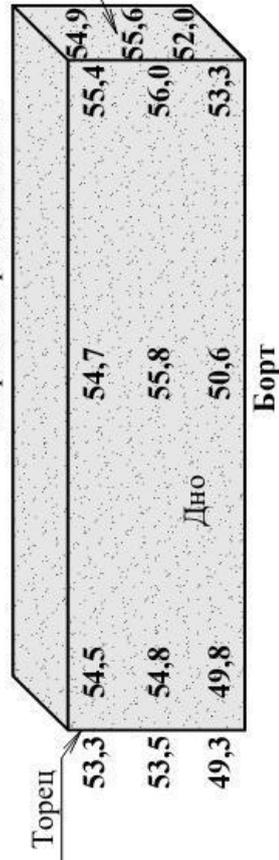


Через 1 ч 55 мин

Вверх массива

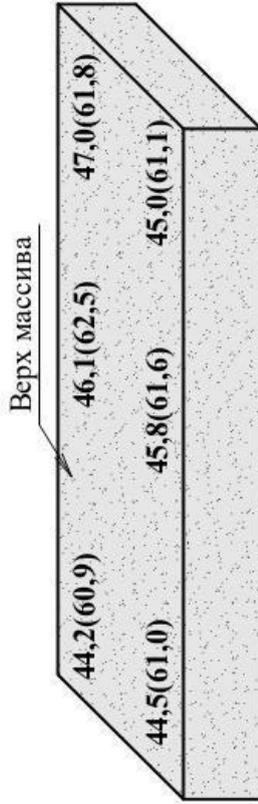


На резке через 2 ч 00 мин



БЕЗ УКРЫТИЯ

В зоне выдержки
Через 15 мин



Через 1 ч 55 мин

Вверх массива



На резке через 2 ч 00 мин

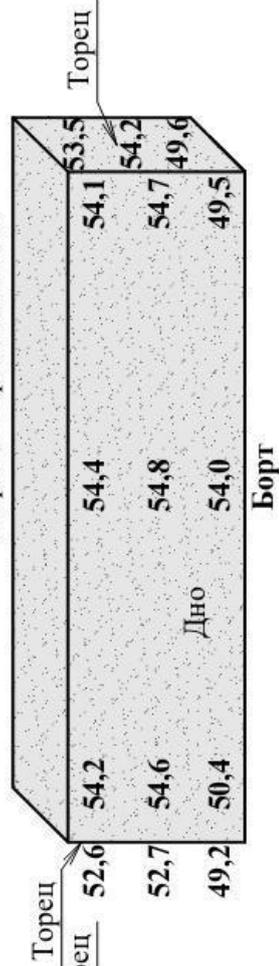


Рисунок 4.5 – Градиенты температур на поверхности массива

Измерения проводились на двух последовательно изготовленных массивах. Массивы поступали в камеру предварительного твердения на выдержку через 10 мин с момента заливки смеси, когда массив уже формировался по высоте за счет газообразования. Одна контролируемая форма следовала по регламенту. Вторую форму после замера температур укрывали полиэтиленовой пленкой, создавая «тепляк» с термосными условиями твердения.

Установлено (рисунок 4.5), что температура на поверхности массива (датчики 1-6 на рисунке 4.4) в проведенной серии эксперимента составляла порядка 44-46 °С. Температура дна массива равнялась в среднем 54 °С. Создание термосных условий за счет пленочного укрытия позволяет уменьшить градиент температур на поверхности массива до 12-15 °С. Пленочное укрытие за счет создания термосных условий позволило получить температуру на наружной поверхности массива (датчики 1-6 на рисунке 4.4) равной в среднем до 54 °С, что соответствует температуре на дне массива.

Температура массива газобетона на поверхности в зоне выдержки без укрытия массива и с укрытием представлена на рисунке 4.6.

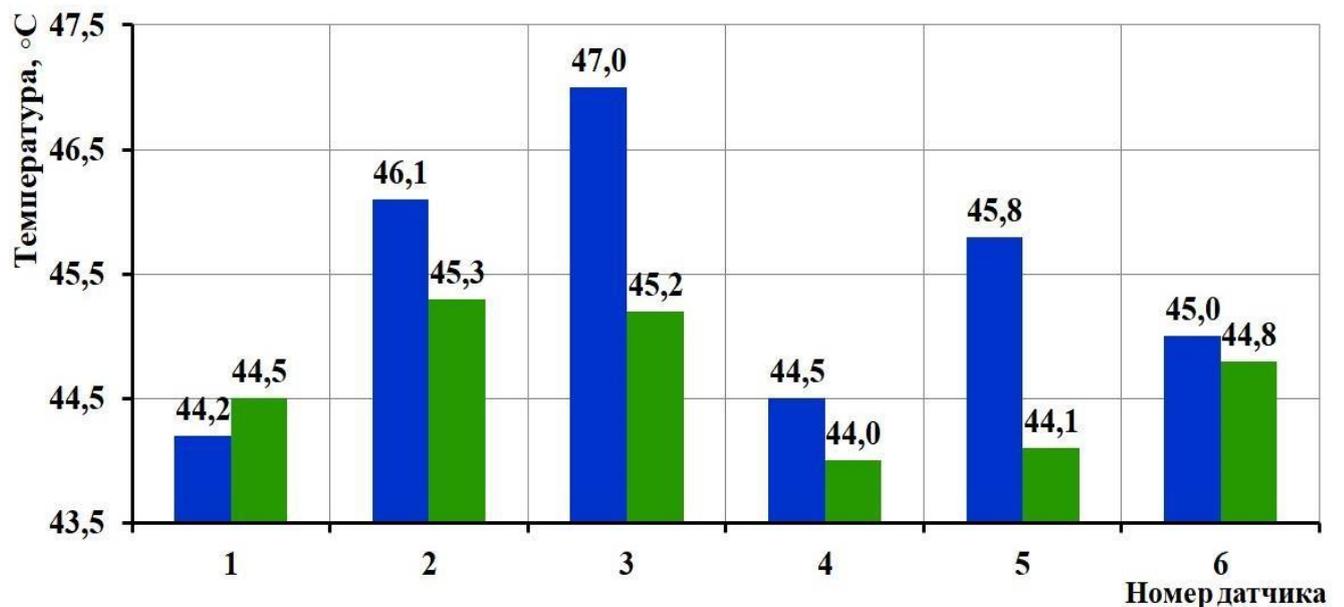


Рисунок 4.6 – Температура массива газобетона на поверхности в зоне выдержки (15 мин):

■ – без укрытия; ■ – с укрытием

Температура массива газобетона на глубине 12 см в зоне выдержки через 15 мин без укрытия массива и с пленочным укрытием представлена на рисунке 4.7. Все шесть датчиков в контрольном массиве без укрытия и экспериментальном, подлежащем теплоизоляции массива, показали сопоставимые значения температур порядка 61-62 °С. Важно отметить, что уже через 15 мин с момента начала процесса формирования ячеистобетонного массива между поверхностью и глубинным слоем имеется градиент температур на уровне 15 °С.

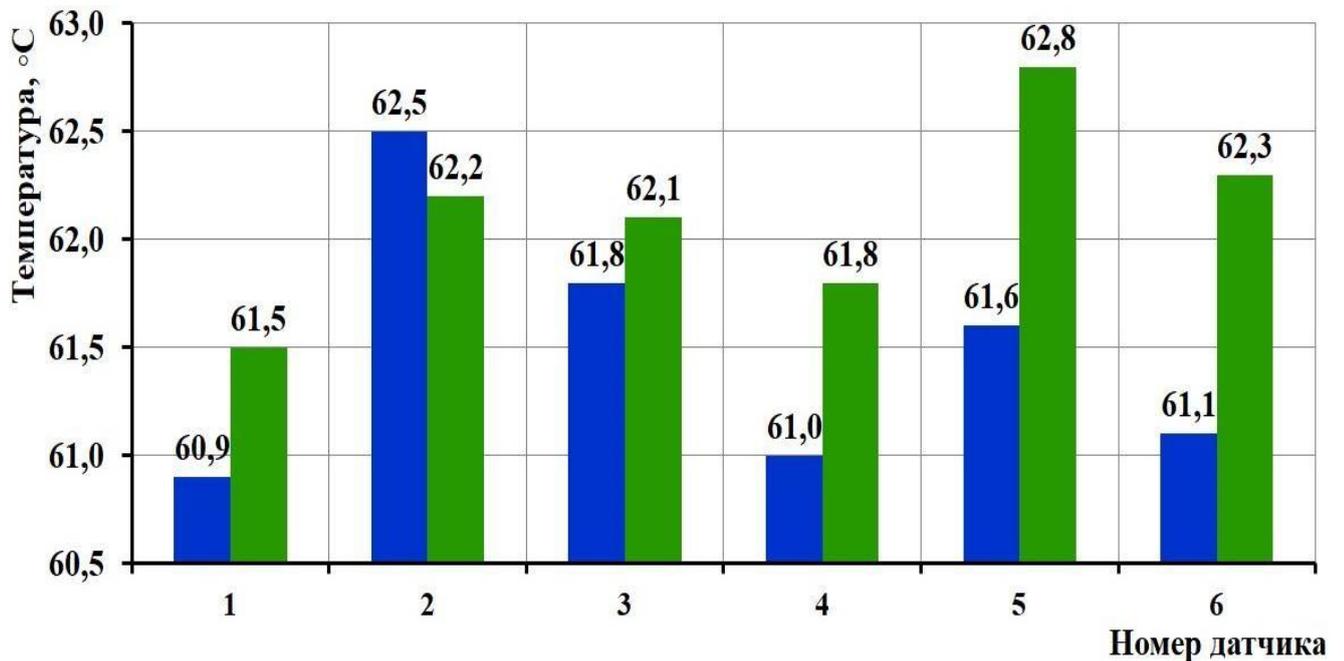


Рисунок 4.7 – Температура массива газобетона на глубине 12 см в зоне выдержки (15 мин):
■ – без укрытия; ■ – с укрытием

Температура массива газобетона на поверхности и на глубине 12 см в зоне выдержки через 1 ч 55 мин без укрытия массива и с укрытием представлена на рисунках 4.8 и 4.9.

Спустя 1 ч 55 мин пластическая прочность массива достигает величины, необходимой для резки. Формы из камеры направляют на распалубку. Температура поверхности в двух контролируемых массивах свидетельствует о том, что укрытие способствует увеличению температуры на 11-12 °С. Без укрытия температура поверхности не увеличивалась. На глубине 12 см (рисунок 4.9) температура в

укрытом массиве достигла 69 °С, что способствовало более чем 18-градусному градиенту с поверхностью.

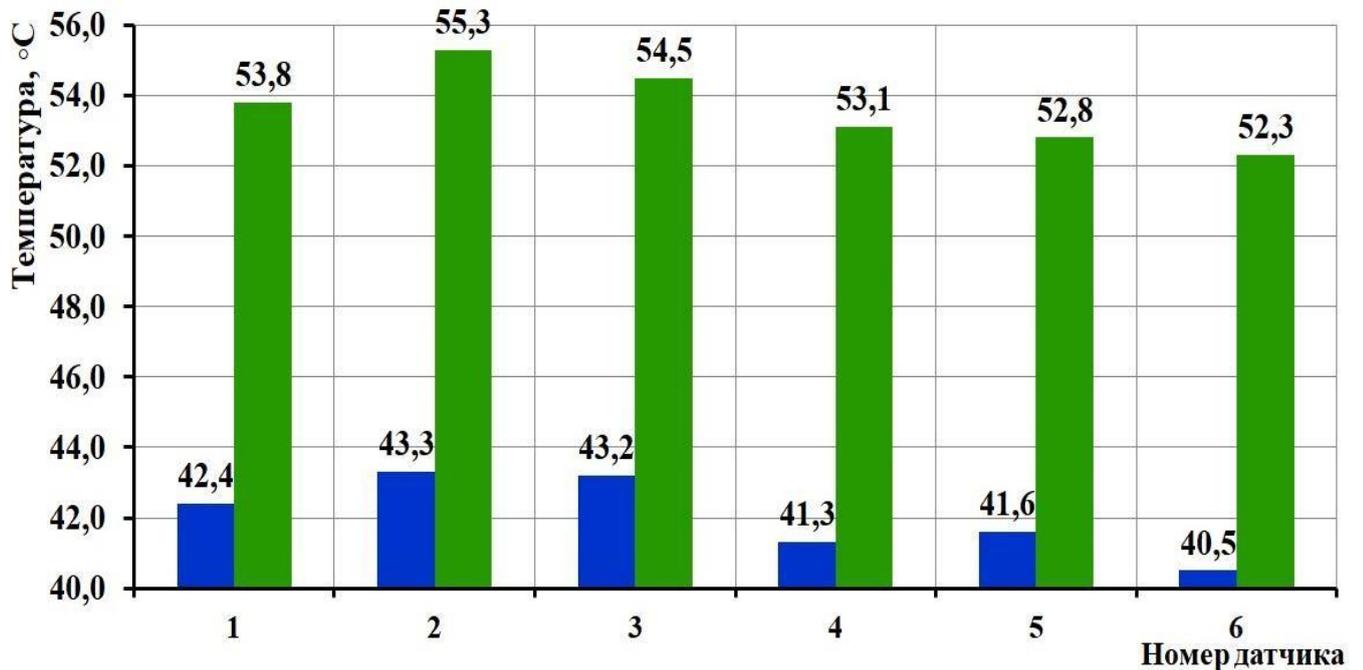


Рисунок 4.8 – Температура массива газобетона на поверхности в зоне выдержки (1 ч 55 мин):
■ – без укрытия; ■ – с укрытием

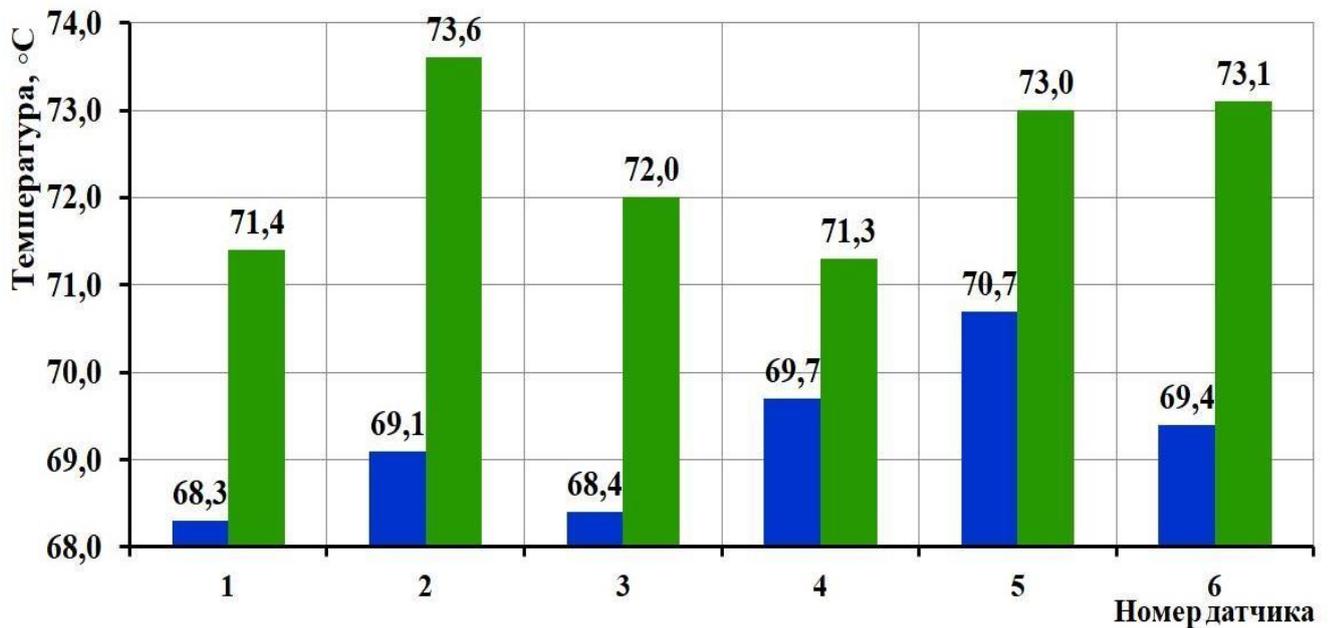


Рисунок 4.9 – Температура массива газобетона на глубине 12 см в зоне выдержки (1 ч 55 мин): ■ – без укрытия; ■ – с укрытием

Температура торцов массива газобетона на резке через 2 ч 00 мин без укрытия массива и с укрытием представлена на рисунке 4.10.

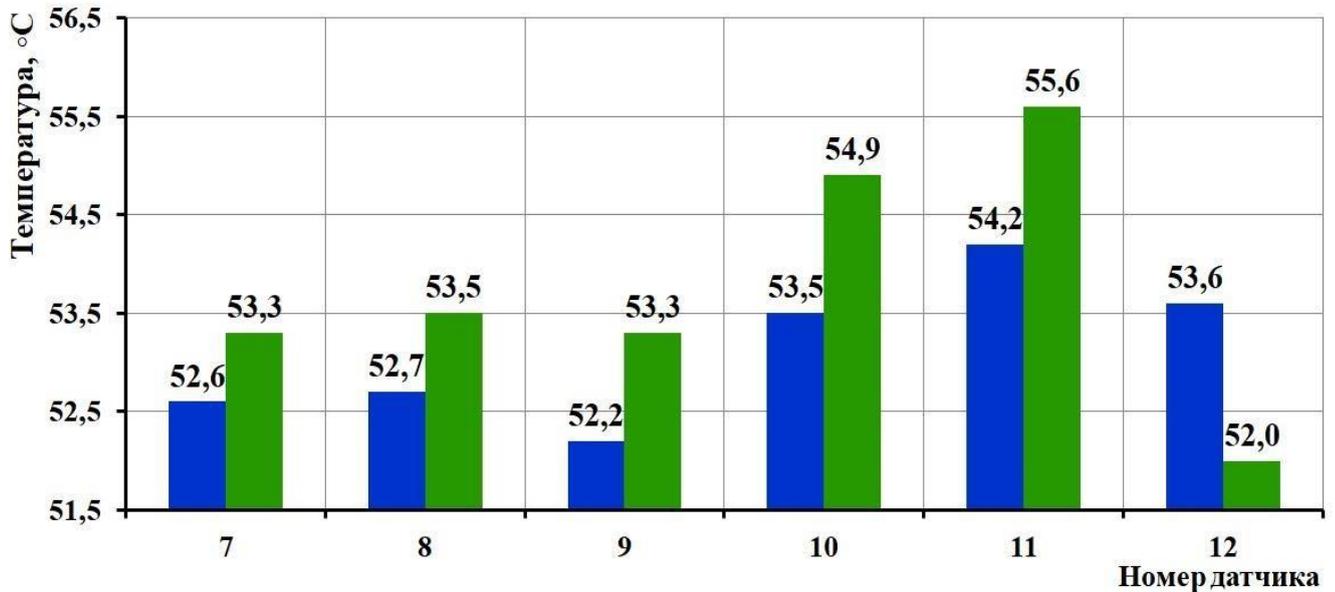


Рисунок 4.10 – Температура торца массива газобетона на резке (2 ч 00 мин):

■ – без укрытия; ■ – с укрытием

Для торца массива газобетона без укрытия наблюдаются сопоставимые значения температур порядка 52-55 °C по отношению к температуре торца массива газобетона с укрытием, температурный градиент на каждом из датчиков для дна массива газобетона с укрытием и без него не превышает 2 °C.

Температура дна массива газобетона на резке через 2 ч 00 мин без укрытия массива и с укрытием представлена на рисунке 4.11.

Согласно данным, представленным на рисунке 4.11, температурный градиент дна массива газобетона с укрытием и без него не превышает 1,5 °C.

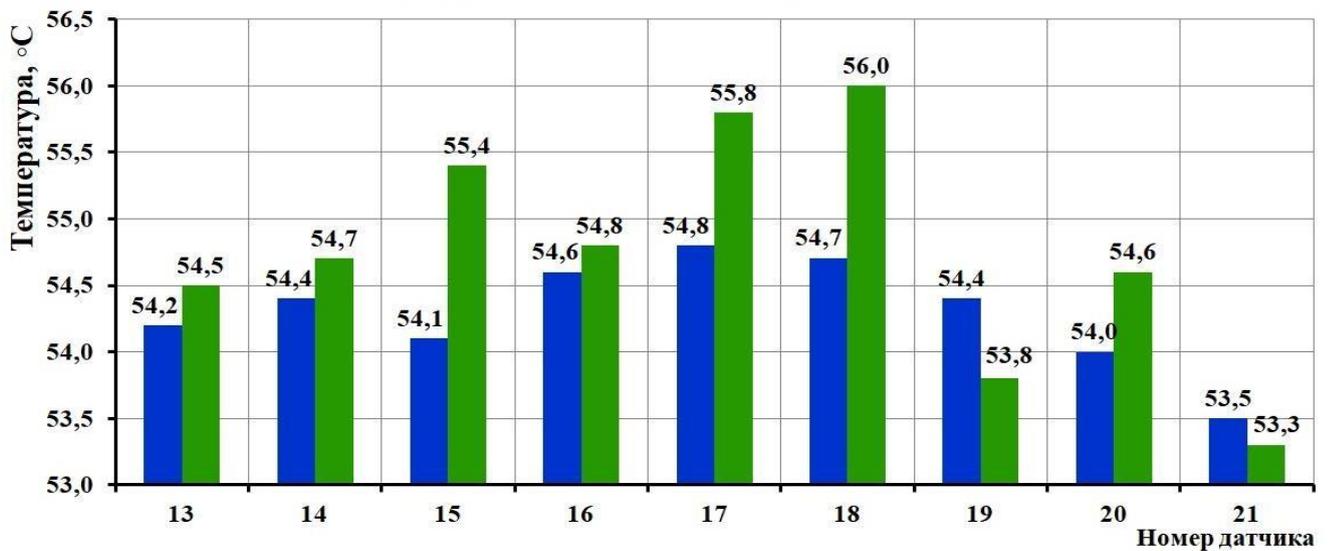


Рисунок 4.11 – Температура дна массива газобетона на резке (2 ч 00 мин):

■ – без укрытия; ■ – с укрытием

В промышленных условиях контролировалась температура при формировании коагуляционной структуры в газобетонной смеси и массиве. Контроль температуры производился в ядре массива, поверхностном слое и в воздухе над массивом. Температуры с датчиков в ядре массива приведены в интегральном и дифференциальном виде на рисунке 4.12.

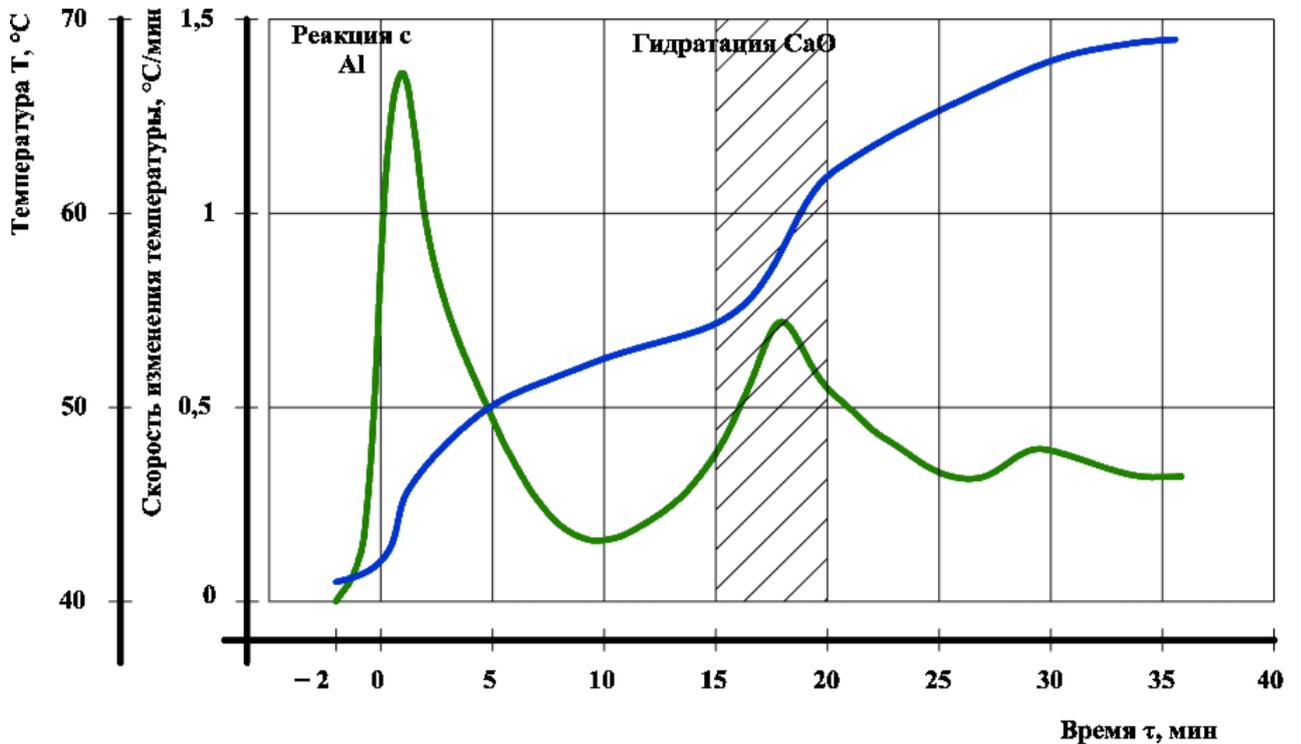


Рисунок 4.12 – Температурные показатели внутри массива: ■ – скорость изменения температуры; ■ – изменение температуры внутри массива; ▨ – время вероятного разрушения

Полученные данные позволяют дать оценку режимов предварительной выдержки массива. Во-первых, величины градиента температуры «ядро – поверхность», а также «поверхность массива – окружающий воздух». Во-вторых, кинетики реакции с дисперсным алюминием и гидратации оксида кальция.

Характер изменения температур внутри массива свидетельствует о том, что наиболее быстрой является экзотермическая реакция алюминия с выделением водорода. Формирование сегментных пузырей происходит в момент наибольшей скорости гидратации оксида кальция к 20 мин от момента заливки.

Спустя 30 мин температура в центре массива достигает 70 °C. Это способствует появлению в массиве градиента – «ядро – поверхность», превышающего 25 °C. Такой высокий градиент температур обуславливает

термические напряжения. Напряжения или релаксируют, или проявляются в виде диагональной трещины массива. Трещина может появиться после резки массива или по завершении его автоклавной обработки. Следовательно, процесс начальной выдержки массива до его резки должен предполагать минимизацию термических градиентов.

Термические напряжения могут приводить к образованию трещин и других дефектов структуры, особенно на этапах резки массива или при проведении автоклавной обработки. Трещины возникают вследствие неравномерного расширения и сжатия материала при изменении температуры, что подчеркивает важность контроля термических условий на всех этапах технологического процесса.

Для минимизации этих рисков необходимо более точно регулировать рецептурный состав газобетонных смесей. В разработанной программе расчета состава автоклавного газобетона [208] учтено, что увеличение расхода извести на 1 кг/м^3 приводит к повышению температуры на $1 \text{ }^\circ\text{C}$, что позволило оптимизировать состав смеси и снизить температурные градиенты и вероятность образования трещин и разрывов сплошности.

Таким образом, исключение воздушных пор, сегментных пузырей и снижение температурных градиентов в массиве позволяет получить изделия из автоклавного ячеистого бетона с высокоорганизованной структурой с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

4.2. Предотвращение крупных дефектов пористой структуры

Недостатком технологии производства автоклавного газобетона является образование пор воздухововлечения в структуре материала на стадии заливки газобетонной смеси, находящейся в турбулентном состоянии, как показано на рисунке 4.13. Крупные поры воздухововлечения, возникающие в процессе формирования и выдержки массива, существенно снижают физико-механические характеристики готовых ячеистобетонных изделий. Пустоты и полости могут привести к снижению прочности и долговечности конечного продукта, что делает

необходимым внедрение эффективных технологических решений для их устранения.



Рисунок 4.13 – Турбулентность смеси

Для повышения эксплуатационных характеристик изделий из автоклавного газобетона разработан метод физико-механической обработки смеси, заключающийся в обеспечении формирования высокоорганизованной пористой структуры массива газобетона. Это достигается путем применения физико-механических воздействий на смесь в процессе ее формирования. В частности, на стадии обработки газобетонная смесь подвергается воздействию вибрации с использованием специальных устройств, таких как виброгребень.

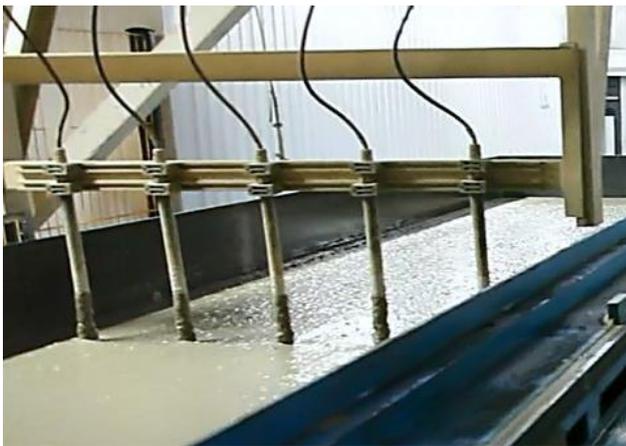


Рисунок 4.14 – Виброгребень

Виброгребень (рисунок 4.14) представляет собой конструкцию, состоящую из стержней, которые погружаются в газобетонную смесь на глубину, при которой зазор между вибратором и дном формы составляет 50 мм. На стадии непосредственно после заливки в форму ячеистобетонная смесь подвергается обработке

посредством погружения в нее стержней виброгребня с дальнейшим перемещением формы под виброгребнем со скоростью 12 м/мин, что способствует дроблению крупных пузырей воздуха до размера менее 2 мм. Этот процесс

позволяет добиться высокоорганизованной пористой структуры газобетона и минимизировать количество дефектов – крупных пор и пустот.

На производственных линиях компаний Wehrhahn и Hess было предусмотрено вибрирование ячеистобетонной смеси после заливки после заливки с применением вибрирующей установки порталного типа, рабочая часть которой состоит из глубинных вибраторов, установленных на плоском металлическом каркасе в 2 ряда по 5 штук в каждом (рисунок 4.15). Вибраторы вертикально опускаются в смесь, находящуюся в стационарно установленной тележке-форме. Зоны действия глубинных вибраторов при таком варианте не покрывают всю площадь ячеистобетонной смеси в форме, при этом образуются обширные непровибрированные зоны в ячеистобетонной смеси между вибраторами, что оставляет большое количество крупных пор воздухововлечения – дефектов структуры, снижающих эксплуатационные характеристики.

Запатентованная нами физико-механическая обработка газобетонной смеси (приложение В) предполагает применение виброгребня, состоящего из 5 вибростержней, установленных в один ряд поперек движению тележки-формы. Для стандартной тележки 1600 мм в ширине применяется виброгребень с шагом вибростержней 350 мм, длиной их рабочей зоны 650-700 мм и зазором между вибратором и дном 50 мм. Величина зазора между вибростержнями и дном формы была определена опытным путем в производственных условиях для минимизации риска образования пустот в верхней части формы и предотвращения чрезмерного воздействия на нижние слои смеси. Оптимальная глубина погружения позволяет разрушать воздушные пузыри и избегать излишнего уплотнения смеси, что могло бы негативно сказаться на однородности пористой структуры.

Скорость перемещения формы с массивом под виброгребнем определена в производственных условиях в ООО «Масикс». Форма с ячеистобетонной смесью перемещается под виброгребнем со скоростью 12 м/мин, вследствие чего количество необработанной ячеистобетонной смеси практически отсутствует, но остается зазор между зонами действия вибраторов, что приводит к неполному избавлению от крупных пор воздухововлечения.

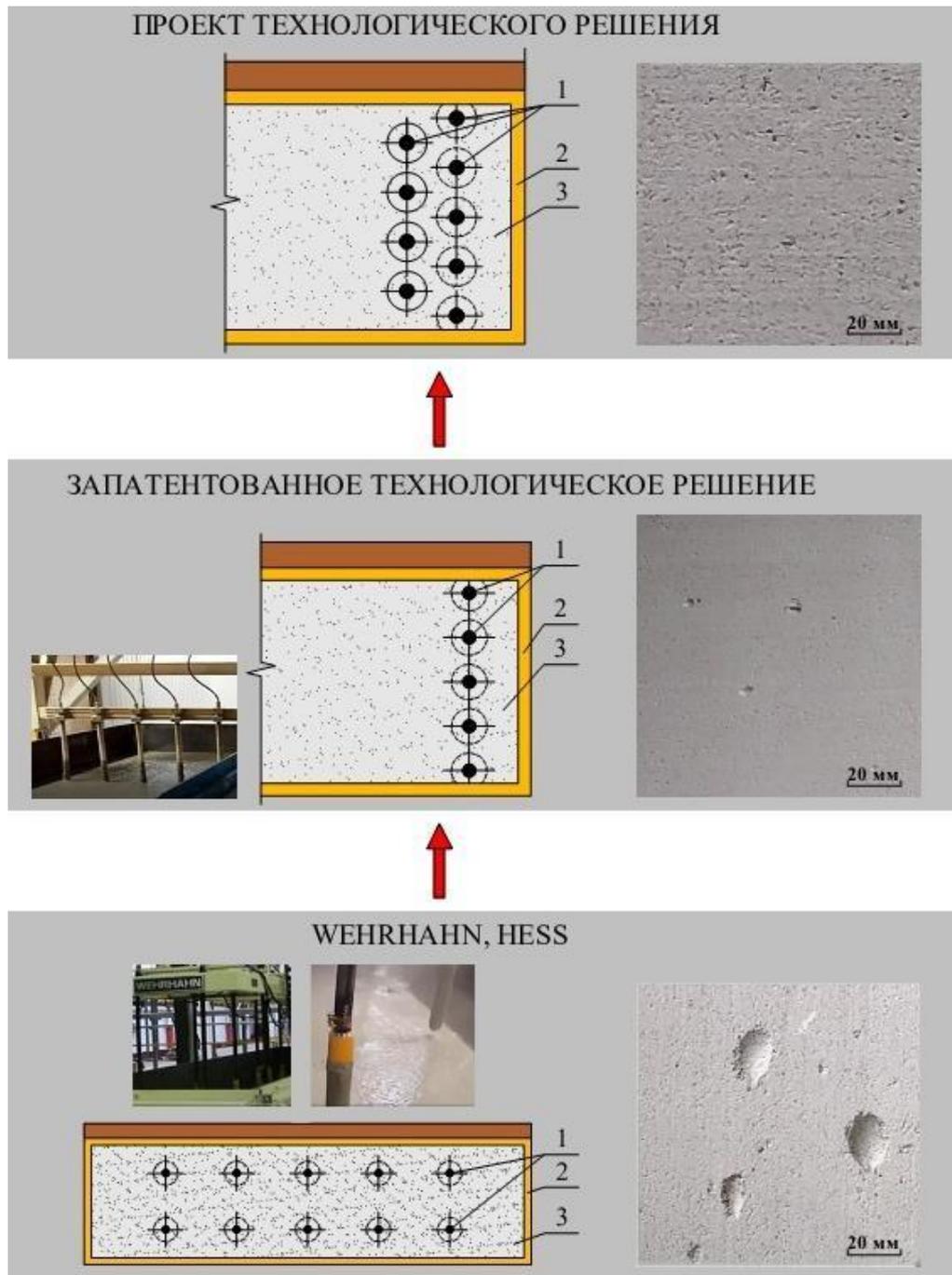


Рисунок 4.15 – Технологии вибрирования массива газобетона: 1 – виброгребень; 2 – тележка-форма; 3 – ячеистобетонная смесь

Проводится дальнейшее совершенствование физико-механической обработки газобетонной смеси за счет модернизации виброгребня путем установки дополнительного ряда из четырех вибраторов в шахматном порядке к уже существующему ряду. Данное решение позволит полностью устранить зазоры между вибраторами, и вся площадь ячеистобетонной смеси подвергается физико-механической обработке. Применение шахматного расположения вибраторов

обеспечивает более равномерное воздействие на всю площадь смеси, что минимизирует риск появления дефектов в пористой структуре.

Проведены испытания образцов газобетона с высокоорганизованной структурой (серия I), образцов газобетона с крупными порами воздухововлечения (серия II), образцов газобетона с расслоением сплошности, трещиной, образованной в результате прорыва сегментного пузыря (серия III), представленных на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 – Испытание образцов газобетона: I – с высокоорганизованной структурой, II – с крупными порами воздухововлечения, III – с разрывом сплошности

Полученные результаты испытаний образцов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний образцов на прочность на сжатие

№ п/п серии	Прочность на сжатие, $R_{сж}$, МПа			
	$R^1_{сж}$, МПа	$R^2_{сж}$, МПа	$R^3_{сж}$, МПа	$R^{cp}_{сж}$, МПа
I	5,5	5,7	5,8	5,67
II	1,45	1,67	1,44	1,52
III	1,73	1,82	1,87	1,8

По характеру разрушения образцы серии I соответствуют типовому разрушению при однородном сжатии. Определена средняя прочность на сжатие образцов с высокоорганизованной структурой и составила 5,67 МПа.

Образцы серии II разрушились не по характерному типу в связи с наличием крупных пор, которые явились концентраторами напряжений. Наличие крупных пор привело к неоднородной структуре композита и вокруг этих концентраторов напряжений начинали происходить разрушения. Наблюдалось раздробление на отдельные призмы и вертикальные трещины, а затем эти разрушения прогрессировали. Средняя прочность на сжатие образцов с крупными порами воздухововлечения составила 1,52 МПа.

Образцы серии III также показали нехарактерное разрушение в связи с тем, что вертикальные трещины также явились концентраторами напряжения, разделяя образцы на две части. Наблюдалась потеря устойчивости отдельных призм в составе куба. Средняя прочность на сжатие образцов с расслоением сплошности (вертикальной трещиной, образовавшейся в результате прорыва сегментного пузыря) составила 1,8 МПа.

Газобетон с высокоорганизованной структурой превосходит традиционный газобетон с наличием дефектов структуры в 3,1-3,7 раз.

Полученные данные позволяют расширить представления о стадиях технологического процесса формирования массива, которые выделены по результатам исследований модельных систем и расчетам тепловыделения в ячеистобетонных смесях (рисунок 4.17).

Начальная стадия (10 с) – заливка смеси в форму с вовлечением в смесь воздуха, образованием пор воздухововлечения в форме перевернутой капли – дефектов структуры ячеистого бетона.

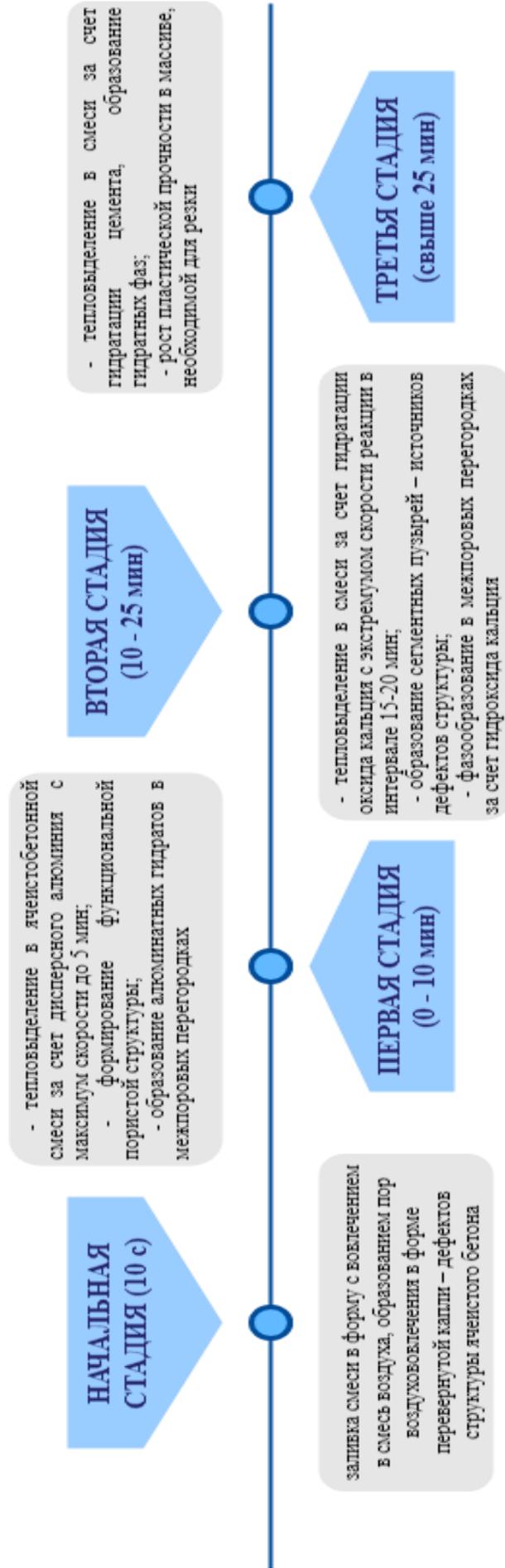


Рисунок 4.17 – Стадии технологического процесса формирования массива

Первая стадия (от 0 до 10 мин) – тепловыделение в ячеистобетонной смеси за счет дисперсного алюминия с максимум скорости до 5 мин. Формирование функциональной пористой структуры. Образование алюминатных гидратов в межпоровых перегородках.

Вторая стадия (от 10 до 25 мин) – тепловыделение в смеси за счет гидратации оксида кальция с экстремумом скорости реакции в интервале 15-20 мин. Образование сегментных пузырей – источников дефектов структуры. Фазообразование в межпоровых перегородках за счет гидроксида кальция.

Третья стадия (свыше 25 мин) – тепловыделение в смеси за счет гидратации цемента, образование гидратных фаз, рост пластической прочности в массиве, необходимой для резки.

4.3. Физико-механические свойства газобетона при оптимальных параметрах технологии

Физико-механические свойства газобетона определялись испытанием образцов-кубов размерами 100×100×100 мм, выпиленных из ячеистобетонных блоков, изготовленных при оптимальных параметрах модернизированной технологии ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия). Полученные результаты были сопоставлены с результатами испытаний образцов газобетона производителей ЗАО «АэроБел» (г. Белгород, Россия), ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия), ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь).

4.3.1. Средняя плотность и предел прочности при сжатии

Средняя плотность и предел прочности при сжатии газобетона с высокоорганизованной структурой определялись испытанием образцов-кубов размерами 100×100×100 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1-78 «Бетоны. Методы определения плотности» и ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Образцы-кубы были выпилены из средней части 12 газобетонных блоков каждой серии

(рисунки 4.18-4.21), дополнительно отшлифованы, взвешены и промаркированы, идентифицируя принадлежность образца к серии. После определения геометрических размеров были отбракованы образцы с недопустимым отклонением плоскости.



Рисунок 4.18 – Подготовка образцов для испытаний из газобетонных блоков ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия), изготовленных по модернизированной технологии



Рис. 4.19 – Подготовка образцов для испытаний из газобетонных блоков ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия)

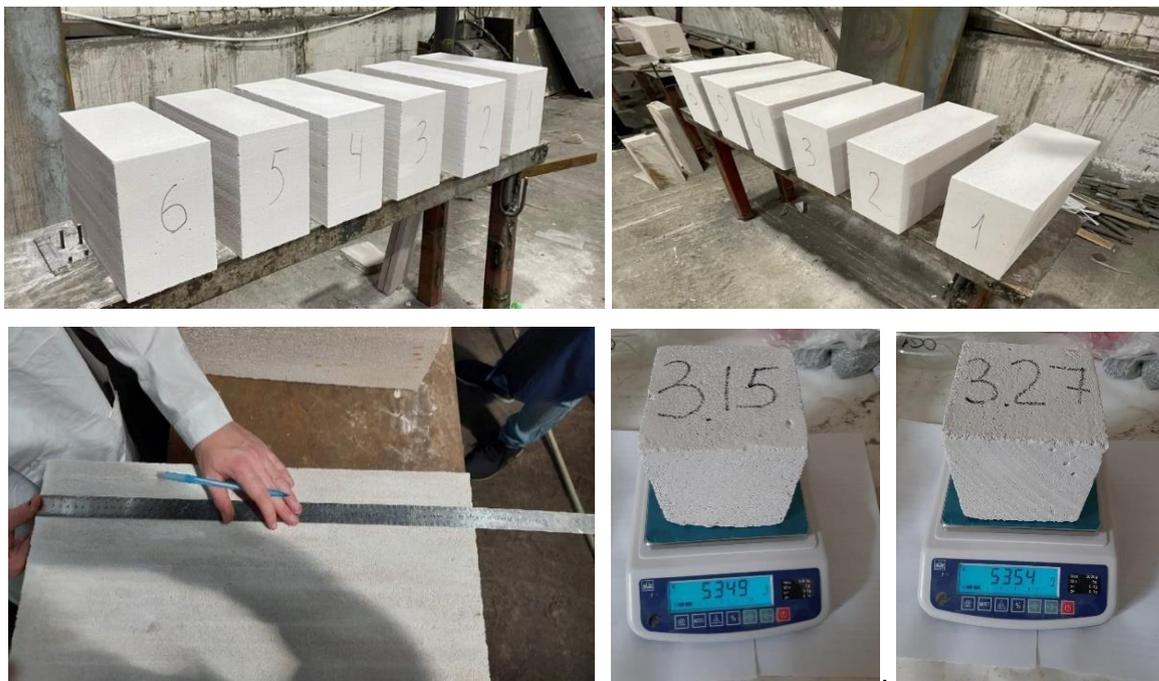


Рис. 4.20 – Подготовка образцов для испытаний из газобетонных блоков ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия)



Рис. 4.21 – Подготовка образцов для испытаний из газобетонных блоков ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь)

Результаты определения средней плотности рассматриваемых образцов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты определения средней плотности

Маркировка образцов	Геометрические размеры			Масса образца бетона до сушки, г	Масса образца бетона после сушки, г	Плотность (в сухом состоянии), кг/м ³	Средняя плотность (среднее значение в сухом состоянии) кг/м ³
	a, см	b, см	h, см				
Производитель ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия) при оптимальных параметрах технологии							
1-12	10,15	9,85	10,20	505,80	485,40	475	485
1-28	10,14	10,15	9,88	504,50	489,3	481	
1-38	10,10	10,10	9,90	515,00	500,50	495	
Производитель ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия)							
2-9	10,20	10,15	9,96	604,14	520,80	505	501
2-13	10,20	10,40	10,20	566,20	542,60	501	
2-36	10,05	10,20	10,00	521,42	508,7	496	
Производитель ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия)							
3-9	10,30	10,10	9,95	697,20	536,40	523	521
3-15	10,10	10,15	10,00	569,30	534,90	521	
3-27	10,10	10,00	10,20	623,60	535,40	519	
Производитель ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь)							
4-1	10,14	9,85	9,93	523,20	497,30	501	517
4-37	10,14	10,15	10,60	608,10	578,70	530	
4-15	10,12	10,11	10,14	587,50	544,10	522	

Прочность на сжатие выпиленных кубов была определена на испытательной машине МИФ – 600.1.2.С при постоянной скорости нарастания нагрузки $0,6 \pm 0,2$ МПа/с (рисунки 4.22-4.25). При обработке результатов испытания учитывали влияние масштабного и поправочного коэффициента для ячеистого бетона, учитывающего влажность образцов в момент испытания.



Рисунок 4.22 – Определение прочности при сжатии кубов из автоклавного газобетона D500 (производитель ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия))



Рисунок 4.23 – Определение прочности при сжатии кубов из автоклавного газобетона D500 (производитель ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия)



Рисунок 4.24 – Определение прочности при сжатии кубов из автоклавного газобетона D500 (производитель ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия)



Рисунок 4.25 – Определение прочности при сжатии кубов из автоклавного газобетона D500 (производитель ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь)

Результаты определения прочности при сжатии газобетонных образцов представлены в таблице 4.3.

Из данных, представленных в таблице 4.3, можно сделать вывод о том, что образцы первой серии, обладающие высокоорганизованной структурой, продемонстрировали типичное поведение при сжатии.

Таблица 4.3 – Результаты определения прочности при сжатии газобетонных образцов

Маркировка образца	Прочность при сжатии, МПа	Масштабные Коэффициенты		Прочность при сжатии с учетом поправочных коэффициентов, МПа	Среднее значение прочности при сжатии с учетом поправочных коэффициентов, МПа
		α	K_w		
Производитель ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия) при оптимальных параметрах технологии					
1-12	6,39	0,95	0,94	5,71	5,91
1-14	6,39	0,95	0,96	5,83	
1-23	6,45	0,95	0,96	5,89	
1-25	6,36	0,95	0,98	5,92	
1-28	6,69	0,95	0,94	5,97	
1-38	6,85	0,95	0,94	6,12	
Производитель ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия)					
2-11	2,30	0,95	1,01	2,20	2,40
2-16	2,80	0,95	0,98	2,60	
2-9	2,50	0,95	0,98	2,30	
2-13	2,80	0,95	1,0	2,60	
2-36	2,40	0,95	0,96	2,20	
2-38	2,30	0,95	1,02	2,20	
Производитель ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия)					
3-27	3,10	0,95	0,98	2,90	3,0
3-13	3,0	0,95	0,98	2,80	
3-25	3,0	0,95	0,96	2,70	
3-15	2,90	0,95	0,94	2,60	
3-38	3,60	0,95	0,98	3,40	
3-9	3,70	0,95	0,94	3,30	
Производитель ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь)					
4-21	3,40	0,95	0,84	2,70	2,76
4-1	3,30	0,95	0,84	2,60	
4-25	3,60	0,95	0,86	2,90	
4-37	3,90	0,95	0,84	3,10	
4-15	3,40	0,95	0,86	2,70	
4-12	3,40	0,95	0,84	2,60	

Средняя прочность на сжатие по отношению к результатам испытаний образцов других производителей выше на 40-50 %. Данная разница в результатах указывает на то, что высокоорганизованная пористая структура способствует равномерному распределению нагрузок и минимизации концентрации напряжений. Отсутствие крупных пустот и сегментных пузырей в этих образцах позволяет им выдерживать значительные механические нагрузки без разрушений.

4.3.2. Экспериментальное исследование эмпирических зависимостей изменения прочности и модуля упругости ячеистого бетона

Несмотря на широкое применение штучных стеновых материалов газобетонных блоков, применение ячеистого бетона в строительных конструкциях достаточно ограничено, причиной этому является недостаточная изученность его деформационно-прочностных свойств. Так как данный вид бетона представлен в широком диапазоне плотностей (от 200 до 1500 кг/м³), актуальным является прогнозирование его прочностных и деформативных свойств для изделий всех представленных марок по плотности.

Известно, что прочность ячеистого бетона зависит от прочности межпоровой перегородки и значения пористости [209-211]. Существуют эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать кубиковую прочность ячеистого бетона на сжатие $R_{b,pore}$ различной степени поризации при известном значении прочности цементной матрицы (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Основные эмпирические уравнения по определению кубиковой прочности ячеистого бетона

№ п/п	Источник	Формула	Обозначение
1	В.А. Пинскер [98]	$R_{b,pore} = R_b(1 - 1,1\sqrt[3]{p})$ (4.1)	R_b – прочность цементной матрицы, МПа;
2	К.И. Бахтияров [120]	$R_{b,pore} = R_b \left(\frac{\gamma_{b,pore}}{\gamma_b} \right)^3$ (4.2)	p – пористость опытного образца материала (от 0 до 1);
3	М.Ю. Бальшин [212]	$R_{b,pore} = R_b \cdot (1 - p)^b$ (4.3)	$\gamma_{b,pore}$ – объемный вес ячеистого бетона;
4	Р. Рышкевич [213]	$R_{b,pore} = R_b \cdot e^{-kp}$ (4.4)	γ_b – объемный вес межпоровой стенки;
5	Д. Хассельман [214]	$R_{b,pore} = R_b - c \cdot p$ (4.5)	b, k, c – эмпирические коэффициенты

Пористость p определяется в зависимости от объемного веса ячеистого бетона γ_c и бетона межпоровой стенки γ_m :

$$p = 1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_m} \quad (4.6)$$

Эмпирические коэффициенты b, k, c находятся по формулам:

$$- \text{коэффициент } b = \log \frac{K_{b,pore}}{1-p R_b}; \quad (4.7)$$

$$- \text{коэффициент } k = - \ln \frac{R_{b,pore}}{R_b} / p; \quad (4.8)$$

$$- \text{коэффициент } c = - \frac{R_{b,pore} - R_b}{p}. \quad (4.9)$$

Образцы в виде кубов используются для выполнения поверочных лабораторных испытаний на производстве в силу оптимальной трудоемкости изготовления образцов и меньшей трудоемкости проведения испытаний. Однако при проектировании строительных конструкций сжатых и изгибаемых элементов основными физико-механическими характеристиками является призмная прочность на сжатие ячеистого бетона и значения его модуля упругости, так как показатель кубиковой прочности ячеистого бетона выше реальной прочности по причине возникновения дополнительных сил трения и эффекта обоймы при испытании (рисунок 4.26). Однако существуют эмпирические зависимости, позволяющие привести значение кубиковой прочности к призмной.

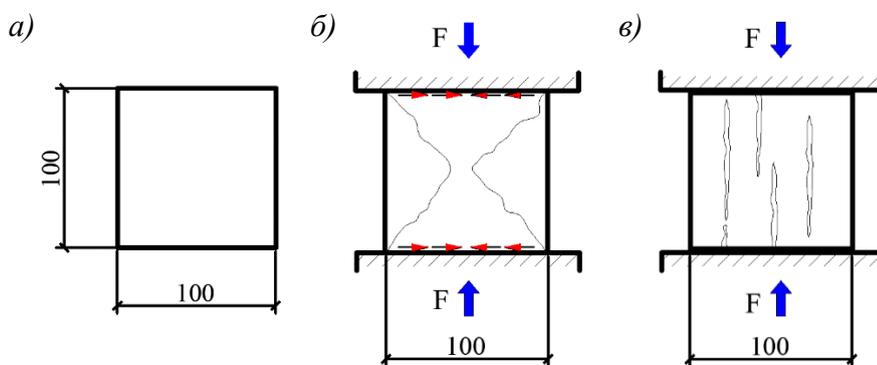


Рисунок 4.26 – Разрушение кубов при испытании на сжатие: *a* – геометрические размеры сечения; *б* – разрушение при трении по опорным плоскостям; *в* – разрушение при отсутствии силы трения

Экспериментальные исследования ячеистобетонных изделий со стороной основания a и высотой h показывают, что призмная прочность бетона меньше кубиковой и она уменьшается с увеличением отношения $\frac{h}{a}$. Стабильное значение прочности достигается при отношении $\frac{h}{a} = 4$ (рисунок 4.27).

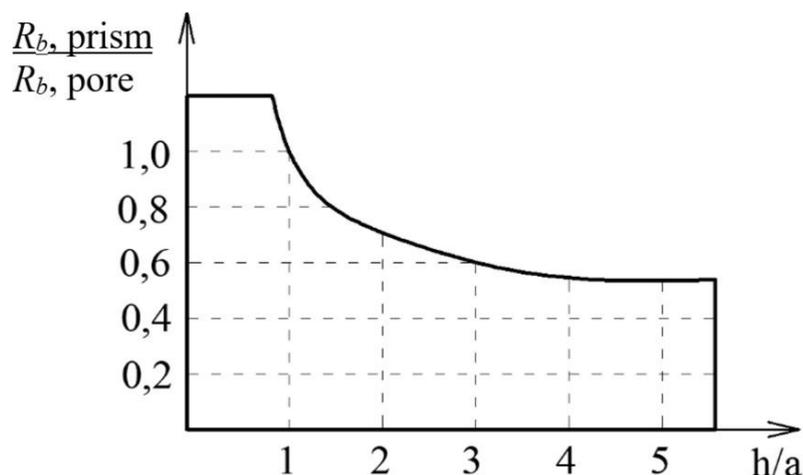


Рисунок 4.27 – График зависимости призмной прочности бетона от отношения размеров испытываемого образца

В отечественной нормативной литературе [215] рекомендовано находить призмную прочность на сжатие $R_{b,prism}$, имея значение кубиковой прочности $R_{b,pore}$, по следующей формуле:

$$\frac{R_{b,prism}}{R_{b,pore}} = (0,77 - 0,00125 \cdot R_{b,pore}) \quad (4.10)$$

Еврокод по проектированию железобетонных конструкций [216] предлагает переходной коэффициент, равный 0,8:

$$R_{b,prism} = 0,8 \cdot R_{b,pore} \quad (4.11)$$

Для ячеистых бетонов зависимость между нормативной средней призмной и кубиковой прочностью была представлена в виде следующей формулы [94]:

$$R_{b,prism} = 0,95 \cdot R_{b,pore} - 0,0049 \cdot R_{b,pore}^2 \quad (4.12)$$

Значения начального модуля упругости ячеистых бетонов E_b используют для расчета жесткости изгибаемых ячеистобетонных элементов конструкций, а также для вычисления деформаций сжатых элементов. Численно модуль упругости равен тангенсу угла наклона касательной линии диаграммы сжатия σ - ε (напряжение-деформация) к оси деформаций ячеистого бетона [94] (рисунок 4.28).

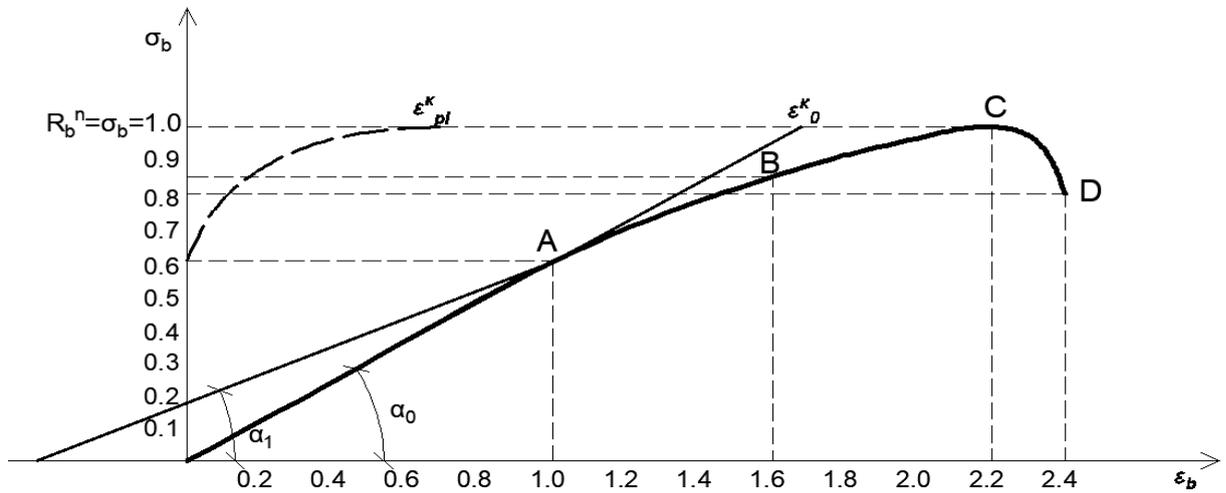


Рисунок 4.28 – Экспериментальная диаграмма «напряжение-сжатие» для ячеистых бетонов

Ячеистый бетон одного класса прочности на сжатие с тяжелым бетоном имеет сравнительно меньшие значения начального модуля упругости [217]. С повышением пористости уменьшается плотность и модуль упругости материала. В работах многих ученых [94, 218-220] эмпирически определена зависимость начального модуля упругости относительно плотности и прочности ячеистого бетона (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Зависимости начального модуля упругости относительно плотности и прочности ячеистого бетона

Источник	Формула	Обозначение
М.Я. Кривицкий [94] и др.	$E_b = k\rho\sqrt{R_{b,prism}}$ (4.13)	k – эмпирический коэффициент, для неавтоклавных ячеистых бетонов $k = 4$, для автоклавных $k = 5$; R_b – прочность ячеистого бетона на сжатие, МПа
М.Р. Jones [218] и др.	$E_b = 33 \cdot \sqrt{W^3} \cdot \sqrt{R_{b,prism}}$ (4.14)	$E_b, R_b = [\text{psi}]$, 145 psi = 1 МПа, W – плотность ячеистого бетона, [psf], 1 psf = 16 кг/м ³ .
А. Saint-Jalmes [219] и др.	$E_b = 5,31 \cdot \rho - 853$ (4.15)	Для плотностей бетона 200-800 кг/м ³
Ф.С. McCormick [220] и др.	$E_b = 0,42 \cdot R_{b,prism}^{1,18}$ (4.16)	Для ячеистых бетонов с песчаным заполнителем

Для проверки эмпирических зависимостей были проведены испытания кубов и призм из ячеистого бетона по определению прочности на сжатие. Испытания

ячеистобетонных кубов размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и призм размерами $400 \times 100 \times 100$ мм проводились согласно ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 24452-2023 соответственно с постоянной скоростью нагружения до момента его разрушения. Внешний вид призм из ячеистого бетона приведен на рисунке 4.29. Экспериментальные данные прочности кубов и призм, модуля упругости приведены в таблице 4.6.

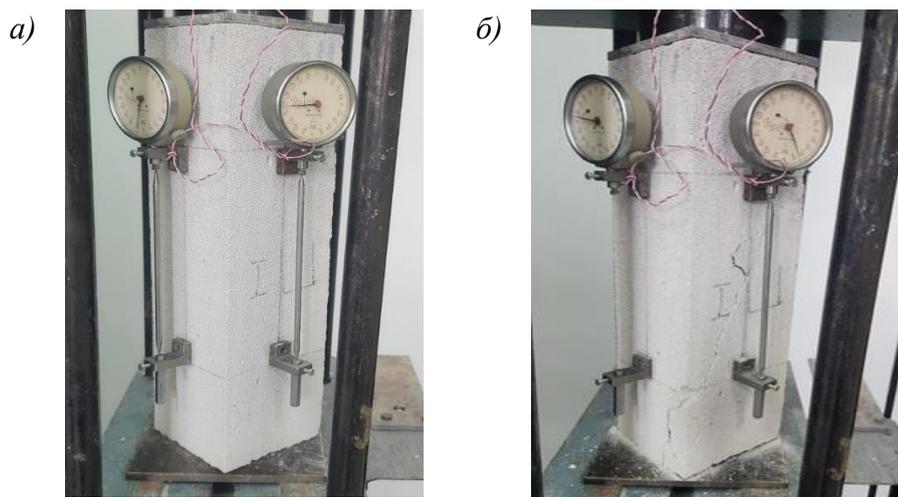


Рисунок 4.29 – Внешний вид призм из ячеистого бетона:
а – до испытания, б – после испытания

Таблица 4.6 – Основные экспериментальные данные испытанных образцов ячеистого бетона

№ п/п	Класс прочности	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Прочность кубиковая $R_{b,pore}$, МПа	Прочность призмная $R_{b,prism}$, МПа	Модуль упругости E_b , МПа
1	V1,5	328	1,98	1,58	649,09
2	V2	439	2,64	1,89	999,39
3	V2,5	549	3,98	3,53	1596,97
4	V3,5	628	4,36	4,30	1988,48
5	V3,5	672	5,47	4,71	1741,21
6	V5	804	7,54	5,39	2503,63

Сравнение эмпирических значений кубиковой прочности ячеистого бетона различной плотности, полученных по формулам В.А. Пинскера, К.И. Бахтиярова, М.Ю. Бальшина, Р. Рышкевича и Хассельмана [98, 120, 212-214] показаны на рисунке 4.30. Коэффициенты b , k , c приняты как среднееарифметическое значение коэффициентов для всех плотностей. В данном случае $b = 1,99$; $k = 3,68$; $c = 75,13$.

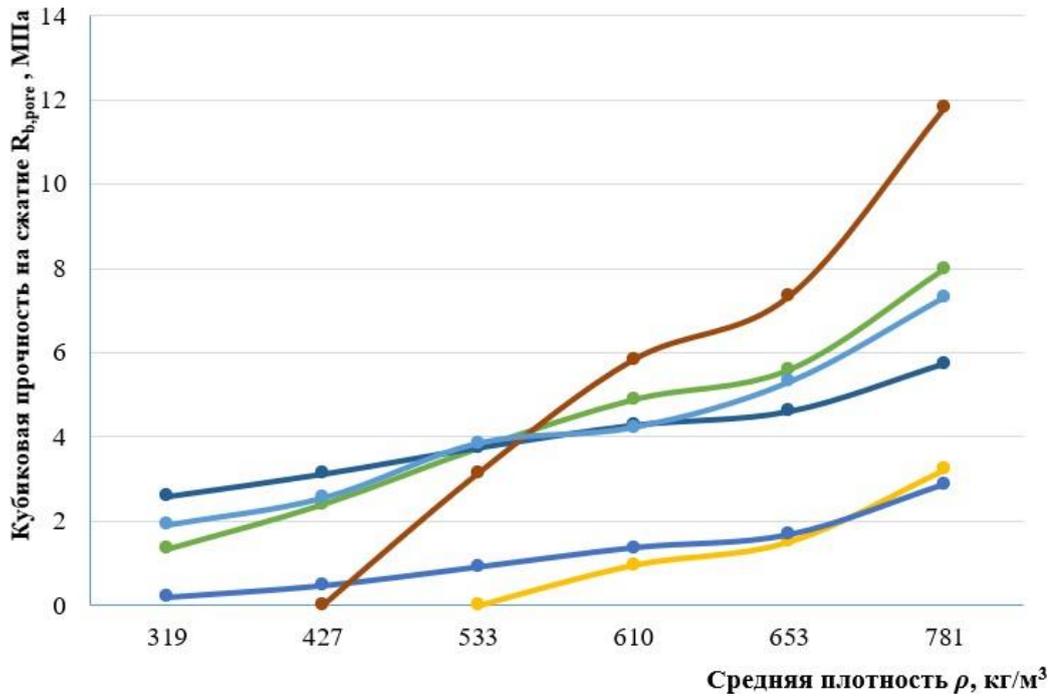


Рисунок 4.30 – Сравнение эмпирических значений кубиковой прочности ячеистого бетона различной плотности с экспериментальными данными: ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.6); ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.7); ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.8); ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.9); ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.10); ● – экспериментальные данные

Исходя из зависимостей изменения прочности ячеистого бетона с нарастанием плотности, видно, что наиболее точно прогнозируют прочность бетона зависимости М.Ю. Бальшина и Р. Рышкевича [212, 213].

Далее проведен анализ зависимостей перевода кубиковой прочности на сжатие к призмной. Призмная прочность определялась для образцов размерами 100×100×400 мм согласно ГОСТ 24452-80. Полученные значения призмной прочности и отклонение их от экспериментальных данных представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнение расчетных значений призмной прочности на сжатие

№ п/п	Средняя плотность, ρ , кг/м ³	Прочность призмная $R_{b,prism}$, по формулам, МПа			Отклонение по формулам, %		
		(4.10)	(4.11)	(4.12)	(4.10)	(4.11)	(4.12)
1	328	1,47	1,54	1,7195	-7,24	-2,36	8,32
2	439	1,96	2,05	2,04	3,80	8,03	7,58
3	549	3,245	3,399	3,59	-8,90	-3,97	1,56
4	628	3,876	4,056	3,93	-10,85	-5,93	-9,32
5	672	4,455	4,675	4,91	-5,69	-0,72	4,10
6	804	5,57	5,86	6,021	3,26	8,05	10,51

Значения расчетной призмной прочности имеют отклонение от экспериментальных значений в среднем 5-10 %. Образцы плотностью 628 кг/м³ имеют примерно одинаковую кубиковую и призмную экспериментальную прочность, что может говорить о погрешности в проведении эксперимента или полученных дефектах материала, полученных в процессе изготовления или транспортировки. Если не учитывать данные значения прочности, то наиболее точным преобразованием является отношение $R_{b,prism} = 0,8 \cdot R_{b,pore}$, описанное в Еврокоде [216].

Модуль упругости в проведенном эксперименте определялся посредством определения деформаций ячеистого бетона с помощью индикаторов часового типа при ступенчатом нагружении призм 10-15 % ожидаемой разрушающей нагрузки. Экспериментальные диаграммы сжатия призмных образцов показали высокую сходимость с модельной диаграммой разрушения ячеистых бетонов, представленной на рисунке 4.31, что подтверждает правильность проведенного испытания.

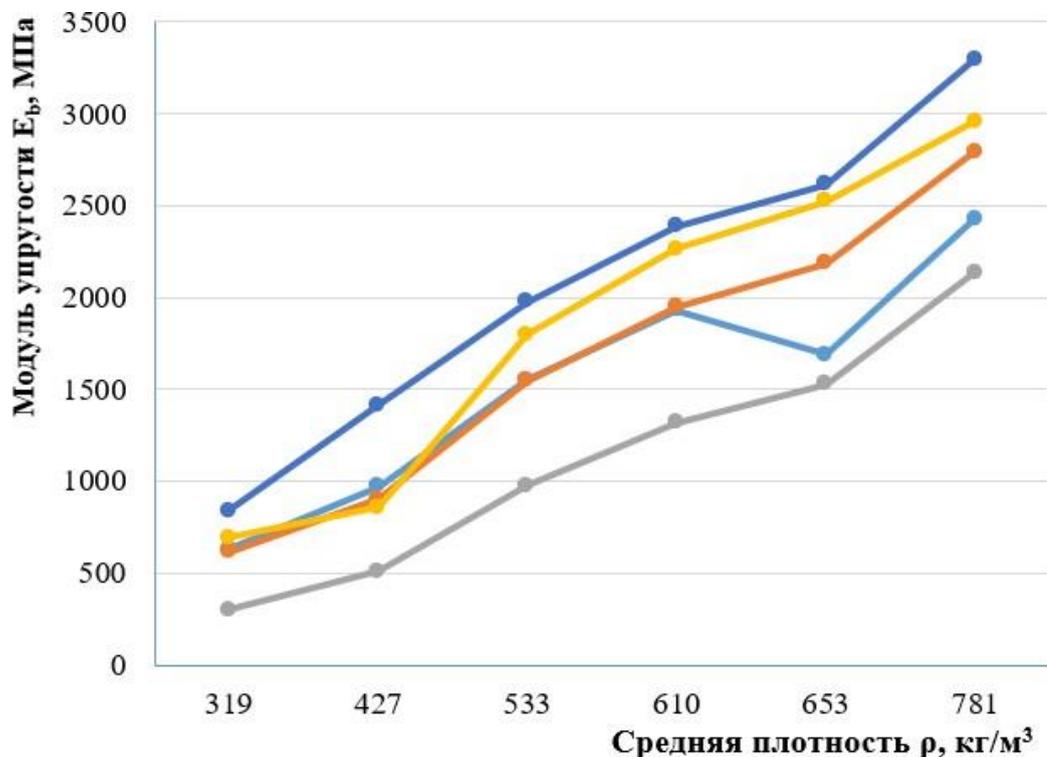


Рисунок 4.31 – Сравнение эмпирических значений модуля упругости ячеистого бетона различной плотности с экспериментальными данными:
 ● – зависимость, рассчитанная по формуле (4.13); ● – то же, по формуле (4.14);
 ● – то же, по формуле (4.15); ● – то же, по формуле (4.16);
 – экспериментальные данные

Анализ полученных графиков изменения модуля упругости показал, что для диапазона плотностей 300-600 кг/м³ наиболее точно представлен прогноз, представленный в работе М.Я. Кривицкого, Н.И. Левина, В.В. Макаричева. Модуль упругости образцов плотности 672 кг/м³ по результатам эксперимента ниже, чем для образцов плотностью 628 кг/м³, что также может быть следствием погрешности в проведении эксперимента.

В результате проведенного анализа исследованных зависимостей и полученных значений можно сделать такие выводы:

– наиболее точно прогнозируют кубиковую прочность ячеистого бетона зависимости, изложенные в работах [212, 213]. Для более точного прогнозирования изменения прочности необходимым является ввод в представленные зависимости влияний структурного характера материала, а именно изменение водоцементного соотношения, количества заполнителя, выделение различных видов пор в теле ячеистого бетона;

– существующие преобразования кубиковой прочности к призмной имеют определенные отклонения от экспериментальных значений. Наиболее точным преобразованием является отношение $R_{b,prism} = 0,8 \cdot R_{b,pore}$, описанное в Еврокоде;

– для диапазона плотностей 300-600 кг/м³ наиболее точно представлен прогноз, представленный в работе [94].

Данное исследование позволяет прогнозировать основные физико-механические характеристики ячеистого бетона, такие как призмная прочность и модуль упругости на основании известных значений прочности цементной матрицы и плотности ячеистого бетона.

4.3.3. Водопоглощение от капиллярного воздействия

Материалы в стеновых ограждающих конструкциях в процессе эксплуатации испытывают негативное влияние различных природных и искусственных факторов. Наличие влаги в стеновых ограждениях отрицательно влияет на

заданные свойства материала: увеличивается теплопроводность, снижается общее сопротивление теплопередачи, ухудшаются прочностные свойства несущих стен. В результате понижается температура помещения, увеличивается влажность воздуха, что ведет к негативным процессам и отрицательно сказывается на тепловом комфорте, энергопотреблении и здоровье жильцов.

Материалы в стеновых ограждающих конструкциях в процессе эксплуатации испытывают негативное влияние различных природных и искусственных факторов. Наличие влаги в стеновых ограждениях отрицательно влияет на заданные свойства материала: увеличивается теплопроводность, снижается общее сопротивление теплопередачи, ухудшаются прочностные свойства несущих стен. В результате понижается температура помещения, увеличивается влажность воздуха, что ведет к негативным процессам и отрицательно сказывается на тепловом комфорте, энергопотреблении и здоровье жильцов.

Влага, в зависимости от происхождения, делится на несколько видов:

– в виде конденсата из воздуха. В холодное время года, когда температура наружного воздуха опускается ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в помещении за счет функционирующей системы отопления температура воздуха положительная. Во внутренней части стены в месте встречи холодного и теплого воздуха, называемой точкой росы, возникает конденсат.

– атмосферная влага, проникающая при смачивании поверхности стены во время осадков;

– грунтовая влага, образующаяся при капиллярном подсосе влаги из грунта;

– эксплуатационная влага, возникшая от смачивания поверхности стен во время технологических процессов промышленных зданий.

Наличие гидроизоляции стеновых ограждений не дает полной защиты от накопления влаги в строительных конструкциях.

Для анализа водостойких свойств материалов стеновых ограждений был проведен эксперимент согласно методике определения водопоглощения от капиллярного воздействия [188].

Для проведения эксперимента подготовлены призматические балки размерами 40×40×160 мм различных строительных материалов: газобетон *D150*, *D200*, *D500*, пеногипс *D600*, газогипс *D800*, пенобетон *D500* и *D600*, гипс *Г-16*, цементно-песчаный раствор *M150*, кирпич силикатный *M150*, кирпич керамический *M150* и *D500*, кирпич корундовый *D500*, кирпич пеношамотный *D500*.

Для определения точных геометрических размеров и массы после охлаждения все образцы были измерены с помощью штангенциркуля и взвешены на весах, прошедших поверку по метрологическим требованиям.

Подготовленные для испытаний образцы 40×40×160 мм помещались на сетку, расположенную на дне емкости с постоянным уровнем воды 20 мм, и начинался отсчет времени по секундомеру (рисунок 4.32).



Рисунок 4.32 – Образцы в начале испытания по определению капиллярного водопоглощения

По истечении 10 мин образцы извлекались из емкости, поверхность вытиралась сухой тряпкой, измерялась высота поглощения воды в образцах (рисунок 4.33), их масса, после чего образцы помещались обратно в воду. Такую же последовательность выполняли спустя 30 и 90 мин с момента погружения в воду (рисунок 4.34).

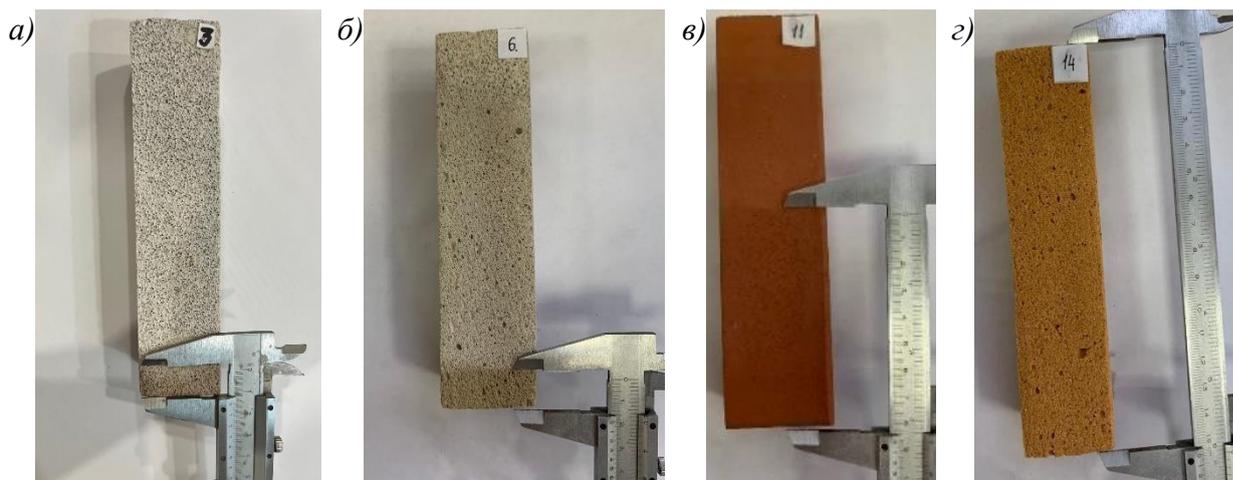


Рисунок 4.33 – Измерение величины водопоглощения образцов после окончания эксперимента:
а – газобетон *D500*, *б* – пенобетон *D500*, *в* – кирпич керамический *M150*;
г – кирпич пеношамотный *D500*



Рисунок 4.34 – Уровень водопоглощения образцов по истечению 90 мин с начала эксперимента

После определения массы влажных образцов был рассчитан коэффициент водопоглощения от капиллярного воздействия (рисунок 4.35), показывающий скорость впитывания влаги образцом за определенный промежуток времени.

Скорость водопоглощения в первые 10 мин эксперимента максимальна и со временем (30 мин, 90 мин) уменьшается практически для всех образцов.

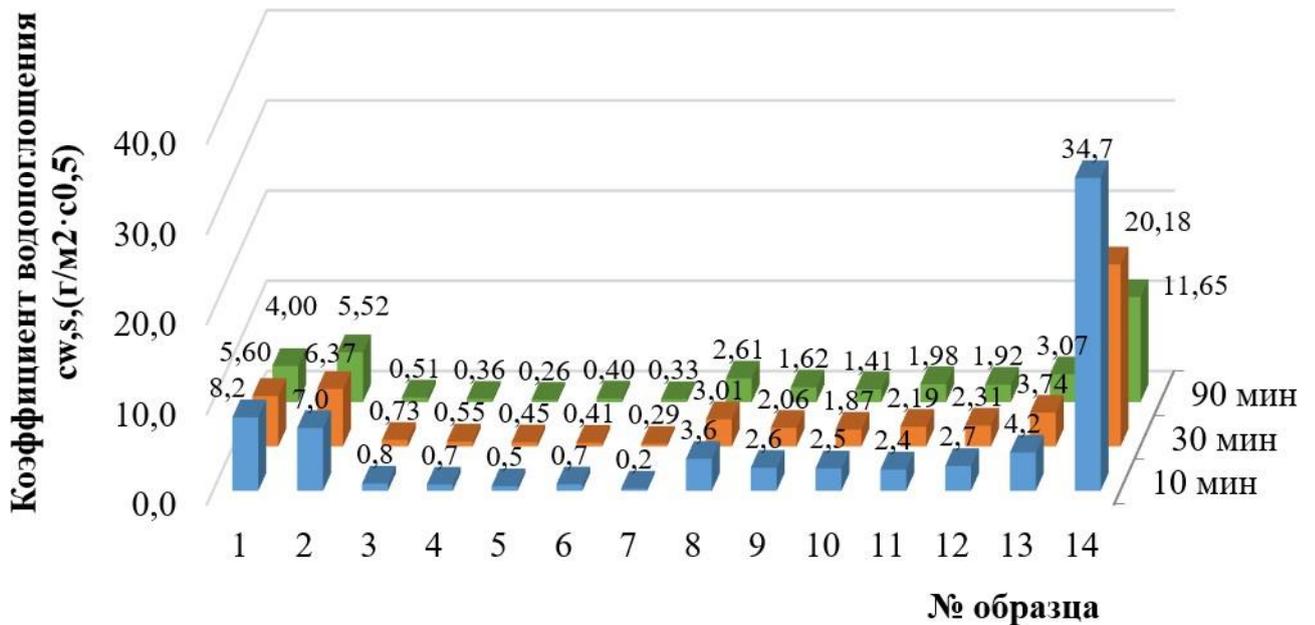


Рисунок 4.35 – Зависимость коэффициента водопоглощения спустя 10 мин образцов:
 1 – пеногипс $D600$, 2 – газогипс $D800$, 3 – газобетон $D500$, 4 – газобетон $D200$, 5 – газобетон $D150$, 6 – пенобетон $D500$, 7 – пенобетон $D600$, 8 – гипс Г-16, 9 – цементно-песчаный раствор $M150$, 10 – силикатный кирпич $M150$, 11 – керамический кирпич $M150$, 12 – керамический кирпич $M150$, 13 – корундовый кирпич $M150$, 14 – пемошамотный кирпич $M150$

На основании проведенных исследований (рисунок 4.35) можно сделать вывод о том, что из всех рассматриваемых материалов, применяемых при устройстве стеновых ограждений, наилучшие показатели водостойкости показали газобетон, в том числе и разработанный газобетон с высокоорганизованной структурой $D500$, а также пенобетон, у которых зафиксированы наименьшие показатели водопоглощения – от 0,2 до 0,8, в сравнении с другими исследуемыми материалами, например, кирпичом керамическим, показатель водопоглощения которого в 3 раза выше, что негативно сказывается на эксплуатационных свойствах стеновых материалов, таких как прочность, морозостойкость и теплозащита. В связи с чем, для устройства ограждающих конструкций следует применять материалы с низким коэффициентом водопоглощения, таким и является разработанный газобетон с высокоорганизованной структурой, применение которого обеспечивает требуемые условия эксплуатации.

4.3.4. Морозостойкость

Характерной особенностью газобетона является зависимость его прочности от степени дефектности межпорового материала, что существенно влияет на его способность противостоять чередующимся изменениям температуры и влажности окружающей среды, а также процессам замораживания и оттаивания. Эти факторы вызывают появление циклических напряжений, которые могут нарушать структуру межпорового материала. Морозостойкость газобетона определялась в соответствии с ГОСТ 31359. Для испытания образцов на морозостойкость были отобраны по 24 образца-куба размерами 100×100×100 мм с каждой серии. Насыщение образцов проводилось погружением в воду на 1/3 их высоты, не допуская их всплытия, и последующим выдерживанием в течение 8 ч; затем погружением в воду 2/3 их высоты и выдерживанием в течение 8 ч, после чего образцы погружали в воду полностью и выдерживали 24 ч (рисунок 4.36).



Рисунок. 4.36 – Насыщение водой газобетонных образцов

Подготовленные основные образцы, предназначенные для определения потери прочности и массы после переменного замораживания и оттаивания, взвешивали (рисунок 4.37) и помещали в морозильную камеру при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.38).



Рисунок 4.37 – Определение массы газобетонных образцов



Рисунок 4.38 – Определение морозостойкости кубов из автоклавного газобетона в морозильной камере

Продолжительность одного цикла замораживания при установленной температуре в камере составляла 4 ч. После этого образцы извлекались из морозильной камеры и помещались в камеру для оттаивания с комнатной температурой и относительной влажностью 90 % на 18 ч. В условиях переменного замораживания и оттаивания при температуре $\pm(18 \pm 2)$ °С образцы-кубы осматривались и испытывались на сжатие после каждых пяти циклов. Если относительное снижение прочности на сжатие газобетона после определенного количества циклов не превышало 15 %, а относительная потеря массы – 5 %, то марка бетона данной серии соответствовала установленным требованиям.

Образцы газобетона с высокоорганизованной структурой, не имея видимых повреждений, выдержали 50 циклов переменного замораживания и оттаивания, в результате чего марка по морозостойкости была назначена как *F50*. Результаты определения морозостойкости образцов представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты определения морозостойкости образцов

Вид испытания	Номер образца	Вид образцов	Прочность при сжатии, МПа	Масса образца, г	Среднее значение	Потеря, %	Примечание (заключение)
1	2	3	4	5	6	7	8
Производитель ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону, Россия) при оптимальных параметрах технологии							
Определение потери прочности	1-13	контрольные	5,7		5,92	0,68	Марка по морозостойкости соответствует F100. После прохождения 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания снижение прочности на сжатие ячеистого бетона не превысило 15%, а относительное значение потери массы не превысило 5%.
	1-17		6,2				
	1-19		5,9				
	1-24		5,7				
	1-34		6,1				
	1-36		5,9				
	1-1	основные	5,9		5,88		
	1-2		6,2				
	1-3		6,0				
	1-5		5,9				
	1-6		6,1				
	1-7		5,8				
	1-11		5,9				
	1-18		6,0				
1-21	5,5						
1-26	5,7						
1-35	5,7						
1-37	5,8						
Определение потери массы	1-9	контрольные		490	500	0,4	
	1-33			510			
	1-16			500			
	1-8	основные		496	498		
	1-10			494			
	1-32			504			

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8	
Производитель ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия)								
Определение потери прочности	2-3	контрольные	2,5		2,8	14,3	Марка по морозостойкости соответствует F50. После прохождения 55 циклов попеременного замораживания появились признаки разрушения образцов – шелушение, трещины, отколы.	
	2-5		2,9					
	2-6		2,4					
	2-14		2,5					
	2-20		3,0					
	2-25		3,5					
	2-2		1,8					
	2-7	2,7						
	2-10	1,9	основные		2,4			2,45
	2-15	2,7			2,8			
	2-17	1,9			2,9			
	2-19	2,4			2,2			
	2-26	2,8			2,9			
	2-29	2,9			2,9			
	2-30	2,2			2,3			
	2-32	2,9						
	2-35	2,9						
2-37	2,3							
Определение потери массы	-23	контрольные	526,9		517,7	0,67		
	2-28		508,6					
	2-33		508,8					
	2-8	основные	515,5		514,2			
	2-12		513,5					
	2-21		513,7					

Продолжение табл. 4.8

1	2	3	4	5	6	7	8
Производитель ЗАО «Аэробел» (г. Белгород, Россия)							
Определение потери прочности	3-30	контрольные	3,5		3,2	13	Марка по морозостойкости соответствует F50. После прохождения 67 циклов попеременного замораживания появились признаки разрушения образцов – шелушение, трещины, отколы.
	3-31		3,1				
	3-32		3,2				
	3-34		2,9				
	3-35		3,1				
	3-37		3,1				
	3-1		3,5				
	3-4	2,8					
	3-6	3,3					
	3-21	3,0					
	3-36	3,4					
	3-28	3,4					
	3-3	3,0					
	3-12	3,3					
	3-16	3,3					
	3-17	3,7					
	3-18	3,3					
3-23	3,5						
3-8	контрольные	502,1	535,3	0,63			
3-10		547,7					
3-14		556,4					
3-20		511,3					
3-22		560,7					
Определение потери массы		3-24			523,7	531,9	

1	2	3	4	5	6	7	8
Производитель ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь)							
Определение потери прочности	4-11	контрольные	3,0		2,3	15	Марка по морозостойкости соответствует F25. После прохождения 32 циклов попеременного замораживания появились признаки разрушения образцов – шелушение, трещины, отколы.
	4-14		2,2				
	4-20		2,0				
	4-23		2,0				
	4-31		2,5				
	4-39		2,1				
	4-2		2,7				
	4-7		2,6				
	4-17		2,8				
	4-18	2,4					
	4-19	2,9					
	4-22	3,3	2,7				
	4-24	2,5					
	4-28	2,2					
	4-29	2,9					
4-30	2,5						
4-33	3,5						
4-38	2,5						
Определение потери массы	4-3	контрольные		523,6	539,9	1,31	
	4-5			533,6			
	4-36			542,5			
Определение потери прочности	4-16	основные		529,3	532,8		
	4-26			528,1			
	4-34			541,0			

Морозостойкость газобетона производителей ЗАО «АэроБел» (г. Белгород, Россия), ООО «ЛСР. Стеновые» (п. Кикерино, Ленинградская обл., Россия) – $F50$, а образцы газобетона ЗАО «Могилевский КСИ» (г. Могилев, Республика Беларусь) выдержали $F25$. Морозостойкость газобетона с высокоорганизованной структурой, изготовленного по оптимальному режиму в ООО «Масикс» без видимых разрушений, с незначительными допустимыми снижением прочности и потери массы выдержали 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания, следовательно, марка по морозостойкости газобетона с высокоорганизованной структурой $F100$.

4.3.5. Теплопроводность

Теплоизоляционные свойства газобетона в сухом состоянии прежде всего зависит от его средней плотности и структуры пор.

Определение коэффициента теплопроводности проводилось по методике в соответствии с ГОСТ 7076. Полученный коэффициент теплопроводности газобетона с высокоорганизованной структурой $\lambda = 0,107$ Вт/(м·°С) (в сухом состоянии) соответствует требованиям ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

4.3.6. Паропроницаемость

Коэффициент паропроницаемости газобетона с высокоорганизованной структурой $\mu = 0,17$ мг/(м·ч·Па) определяли по ГОСТ 25898-2020 на образцах размерами 100×100×30 мм, выпиленных из газобетонного массива.

Сопrotивление паропроницанию газобетона удовлетворяет нормативным требованиям.

4.3.7. Усадка

Определение усадки образцов газобетона проводилось по ГОСТ 25485-2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия» при высыхании образцов в течение длительного времени в естественных условиях, что позволяет более полно представить сложную динамику изменений усадочных деформаций ячеистого бетона в условиях, приближенным к реальным.

Усадочные деформации газобетона определялись испытанием трех образцов-призм размером 40×40×160 мм. Образцы выпиливали из контрольного ячеистобетонного блока размерами в соответствии с требованиями ГОСТ 25485-2019, не позднее чем через 24 ч после автоклавной обработки. До испытания образцы хранились в закрытых эксикаторах над водой.

В центре каждой торцевой грани образца укрепляли стальной репер для крепления образца в штативе с индикатором часового типа и измеряли массы и усадку образцов до получения постоянных значений усадки.

Результаты испытания усадочных деформаций газобетона с высокоорганизованной структурой представлена на рисунке 4.39.

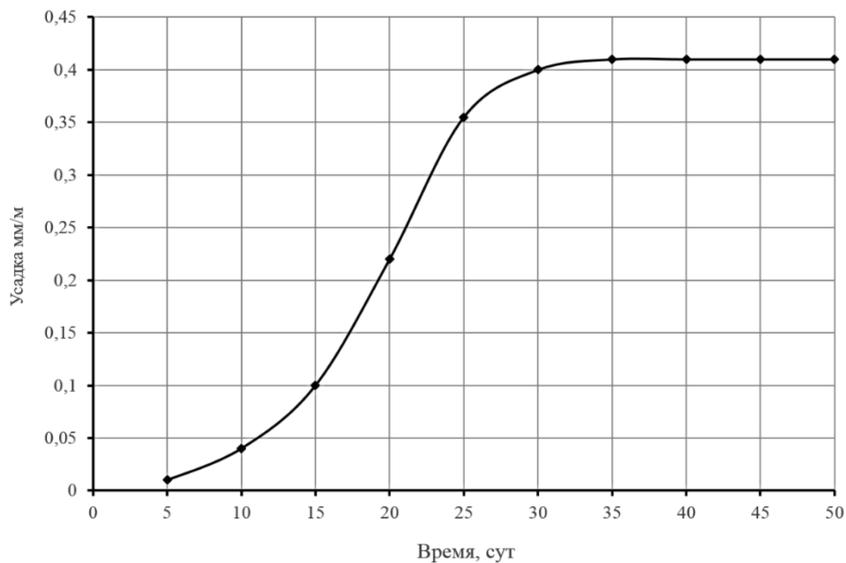


Рисунок 4.39 – Усадочные деформации газобетона с высокоорганизованной структурой

Физико-механические свойства газобетона с высокоорганизованной структурой представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Физико-механические свойства газобетона

Показатель	Технология газобетона	
	модернизированная	заводская
Средняя плотность, кг/м ³	485 (D500)	500 (D500)
Класс бетона	B5	B2,5
Усадка, мм/м	0,39	0,46
Коэффициент паропроницаемости, мг/м·ч·Па	0,17	0,18
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	0,107	0,119
Морозостойкость	F100	F25-50

Газобетон с высокоорганизованной структурой по эксплуатационным свойствам превосходит характеристики традиционных автоклавных газобетонов (таблица 4.9), что объясняется управлением формирования пористой структуры, исключением дефектов – пор воздуха и разрыва сплошности, за счет научно обоснованного технологического решения обработки ячеистобетонной смеси виброгребнем в момент после ее заливки и применения термосного метода предварительного твердения, снижающего градиенты температур по высоте массива.

4.4. Выводы

1. Установлено, что экзотермические реакции, возникающие при гидратации вяжущих компонентов, играют критическую роль в формировании структуры ячеистого бетона. Анализ трех модельных систем («Известь – Алюминий – Вода»; «Известь – Алюминий – Цемент – Вода»; «Известь – Алюминий – Цемент – Гипс – Вода») показал, что добавление гипса замедляет начальные реакции гидратации, что позволяет избежать резких температурных пиков и способствует более равномерному распределению тепла.

2. Исследования продемонстрировали, что высокие температурные градиенты внутри массива бетона могут приводить к образованию трещин, разрывов сплошности и других структурных повреждений. Наиболее значительные градиенты были зафиксированы между ядром и поверхностью массива, что подтверждает необходимость контроля температуры на всех стадиях твердения и создание термостных условий в камере предварительного твердения.

3. Создание термосных условий с использованием пленочного укрытия позволяет значительно снизить температурные градиенты и уменьшить риск термических напряжений. Установлено, что применение пленочного укрытия позволяет снизить градиент температуры на 12-15 °С и достичь более равномерной температуры по всей высоте массива.

4. Внедрение методов физико-механической обработки газобетонной смеси, таких как использование виброгребня, позволило значительно повысить однородность пористой структуры материала. Это достигается путем дробления крупных пор воздухововлечения до размера менее 2 мм и минимизации дефектов в структуре.

5. Проведенные испытания показали, что новая технология вибрирования с установкой дополнительного ряда вибраторов в шахматном порядке позволяет практически полностью устранить крупные поры воздухововлечения в газобетонной смеси. Это приводит к улучшению физико-механических свойств конечного продукта.

6. Испытания образцов газобетона с высокоорганизованной структурой с маркой по средней плотности $D500$ показали среднюю прочность на сжатие 5,67 МПа, тогда как образцы с крупными порами или расслоением демонстрировали значительно более низкие значения прочности (1,52 и 1,8 МПа соответственно). Это подтверждает важность контроля за формированием структуры материала для исключения крупных пор воздухововлечения и сегментных пузырей, что позволяет достичь высоких эксплуатационных характеристик.

7. Установлено, что наличие крупных пор и трещин в структуре газобетона служит концентраторами напряжений и приводит к нехарактерным разрушениям образцов. Это подчеркивает необходимость внедрения эффективных технологий для предотвращения образования дефектов во время производства.

5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА И ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1. Совершенствование технологической схемы производства изделий из газобетона автоклавного твердения

Предложено совершенствование технологической схемы производства газобетона (рисунок 5.1) за счет введения физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки (стадия А) и термосного метода в камере предварительного твердения (стадия Б), что позволило получить газобетон с высокоорганизованной пористой структурой с обеспечением класса прочности *B5* при марке по средней плотности *D500*.

Для производства изделий из газобетона применяются следующие материалы: вяжущие компоненты, такие как портландцемент, негашеная кальциевая известь, гранулированный доменный шлак, а также зола, полученная при сжигании горючего сланца и некоторых видов бурых углей; кремнеземистые компоненты, включая кварцевый песок и отходы добывающей и обогащательной промышленности, содержащие кремнезем, а также золу от сжигания бурых и каменных углей; газообразователи, среди которых алюминиевая пудра (или паста), используемая с добавлением поверхностно-активных веществ; и пластифицирующие добавки, которые регулируют процессы газообразования и загустения.

Сырьевые материалы, применяемые для изготовления изделий из газобетона, должны соответствовать требованиям российских стандартов для ячеистых бетонов, а также соответствовать действующему стандарту на материал. Пригодность сырьевых материалов для данных условий производства определяется на основе технологических испытаний. Объем испытаний уточняется в каждом конкретном случае.

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

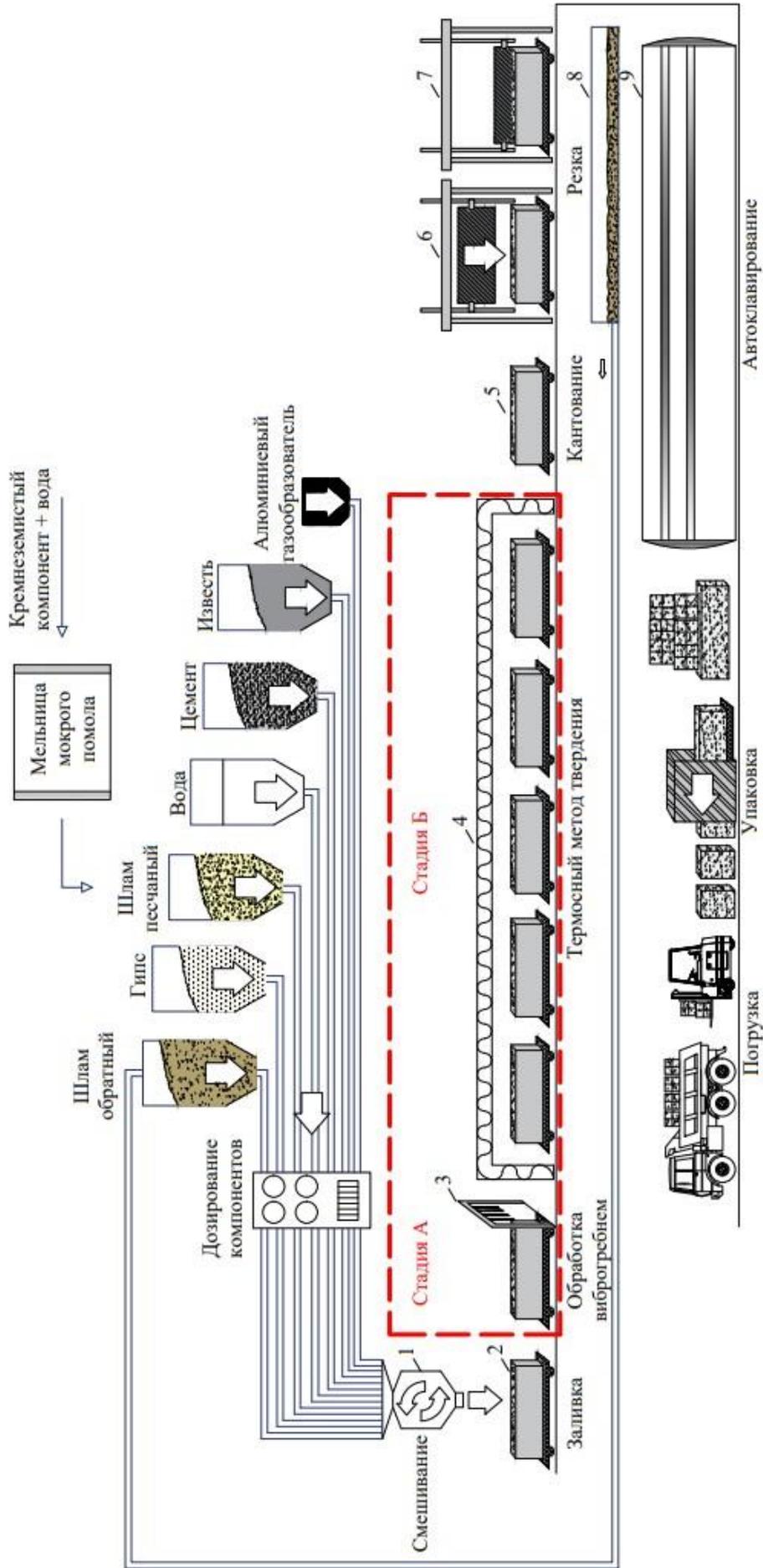


Рисунок 5.1 – Совершенствование технологической схемы производства изделий из автоклавного газобетона

Исходные компоненты газобетонной смеси подвергаются предварительной обработке, включающей измельчение песчаного шлама в мельнице мокрого помола и измельчение извести в шаровой или вертикальной мельнице. Эти шаги направлены на оптимизацию физико-химических свойств исходных материалов перед их интеграцией в смесь.

Подготовка сырьевых материалов заключается в измельчении компонентов сырьевой смеси, взятых в определенных пропорциях, и их усреднении (гомогенизации).

Измельчение является одной из основных технологических операций, в результате которой достигается не только повышение реакционной поверхности, но и механическое активирование в результате увеличения свободной энергии. Измельчение исходных материалов предусматривает уменьшение диаметра частиц (повышение дисперсности) до размеров сопоставимых с толщиной межпоровых перегородок. При этом, чем ниже плотность газобетона и соответственно тоньше межпоровая перегородка, тем выше должна быть дисперсность компонентов сырьевой смеси.

Применяют два способа подготовки сырьевых материалов:

– мокрый помол основной массы кремниземистого компонента (песка) и сухой помол известково-песчаного вяжущего (при соотношении известь:песок = 1:0,2). Содержание воды в песчаном шламе поддерживается на уровне, обеспечивающем рекомендуемую текучесть суспензии (плотность шлама около $1,6 \text{ г/см}^3$);

– совместный сухой помол компонентов сырьевой массы – извести, цемента и песка при влажности песка не выше 2 % по массе.

Помол сырьевых материалов производится в отделении подготовки сырьевых материалов в шаровых мельницах.

Следует отметить, что качество получаемого газобетона обусловлено не только одним качеством применяемых сырьевых материалов, но зависит также и от условий и методов приготовления растворной составляющей (точности дозирования, способов и параметров перемешивания смеси) и поризуемой матрицы, технологических приемов поризации, формования изделий и параметров тепловлажностной обработки.

Приготовление ячеистобетонной смеси осуществляется в смесеприготовительном отделении завода. Процесс перемешивания смеси выполняется в специализированных газобетоносмесителях, которые обеспечивают высокую степень гомогенности. В ходе приготовления ячеистобетонной смеси вяжущее, кремнеземистый компонент, алюминиевая суспензия и вода дозируются по массе в соответствии с установленной рецептурой, что гарантирует соблюдение заданного состава смеси. Последовательность загрузки материалов в гидродинамический смеситель может варьироваться. При заливке смеси на основе смешанного вяжущего подвижность по прибору Суттарда для литьевой технологии обычно составляет 20-30 см (при средней плотности бетона 400-700 кг/м³), а для вибрационной или ударной технологий – 10-16 см соответственно.

Материалы из расходных бункеров передаются в смеситель по запросу с центрального пульта управления с использованием шнековых транспортеров и дозаторов, что обеспечивает точную дозировку и последовательное введение компонентов в технологический процесс. Дозировка компонентов смеси осуществляется автоматически с учетом заданной последовательности. В процессе приготовления ячеистобетонной смеси вяжущее, кремнеземистый компонент, алюминиевая суспензия и вода дозируются по массе согласно заданной рецептуре. Точность дозирования составляет $\pm 2\%$ для кремнеземистого компонента и $\pm 1\%$ для вяжущего.

Последовательность загрузки материалов в смеситель для ячеистобетонной смеси должна быть следующей: сначала загружаются песчаный и обратный шлам, затем вода, вяжущее и добавки; альтернативно, можно использовать последовательность: сначала загружают песчаный и обратный шлам и воду и

перемешивают 30 с, затем добавляют вяжущее и перемешивают в течение 3-4 мин при работе вибрационной системы. После этого в смеситель подают алюминиевую суспензию, и смесь дополнительно перемешивают в течении 1-2 мин.

В смесителе материалы подвергаются интенсивному перемешиванию в течение 3-7 мин с целью достижения однородности состава. После завершения смешивания смесь направляется в форму. После заливки разгрузочное устройство переводится в нерабочее положение и погружается в бак с промывочной водой.

Формование ячеистобетонного массива осуществляется в соответствии с установленным технологическим процессом, который может быть литьевым, вибрационным или ударным. Формовочно-резательное отделение включает в себя пост для формования ячеистобетонных массивов, участки предварительной выдержки массивов перед их резкой (включая распалубку и очистку, сборку и смазку форм, пост резки и калибровки), а также участок утилизации отходов и участок комплектации и транспортировки разрезанных массивов.

Процесс формования включает в себя разгрузку (заливку) смеси из смесителя в форму и последующее вспучивание смеси. В процессе вспучивания могут применяться динамические воздействия. Завершение процесса формования происходит после достижения максимальной высоты вспучивания и прекращения активного газовыделения. Общая продолжительность цикла формования, включая установку форм, заливку смеси и сам процесс формования, составляет 12-20 мин.

Стадия формования является одной из ключевых операций в технологии производства газобетонных изделий. На этом этапе необходимо обеспечить выполнение основного условия для получения поризованной массы с хорошо организованной пористостью: кинетика газообразования должна соответствовать изменениям реологических свойств массы.

Формование газобетонных массивов осуществляют в металлических формах высотой до 600 мм. Подготовка формы заключается в тщательной очистке и последующей смазке поддона и бортов формы и прогрева бортоснастки. После вспучивания формы с ячеистобетонной смесью выдерживаются на постах,

желательно при температуре воздуха не менее +15-20 °С до приобретения требуемой пластической прочности сырца.

При использовании литьевой технологии применяется стендовый метод. В данном случае формы устанавливаются вдоль пути движения газобетоносмесителя, и после заполнения их смесью формы не должны перемещаться или подвергаться вибрациям до завершения процесса вспучивания и схватывания массы.

Формование изделий при вибрационной технологии осуществляется по агрегатно-поточной или конвейерной схеме. Подготовленные формы подаются на виброплощадку, где они жестко фиксируются, заполняются смесью и подвергаются вибрационной обработке, которая начинается одновременно с заливкой массы. После завершения вибровспучивания форма передается на пост вызревания для набора прочности, необходимой для удаления горбушки и последующей резки массива на изделия. Операции по удалению горбушки и резке массивов выполняются на специализированной машине с использованием металлических струн, которые осуществляют возвратно-поступательные и вращательные движения.

Объемная масса газобетона при постоянной дозировке газообразователя зависит от способности смеси удерживать газ, что определяется изменениями ее структурно-механических характеристик во времени. Если после газовыделения смесь не будет обладать достаточной несущей способностью, произойдет ее осадка, сопровождающаяся явлением «ложного кипения», когда газ прорывается из формуемого изделия. В таких условиях структура ячеистого бетона будет характеризоваться наличием пор неправильной формы, большим количеством сообщающихся пор и неоднородным распределением пористости. Если схватывание происходит быстрее, чем газовыделение, смесь затвердевает до завершения процессов газовыделения, что может привести к тому, что заданная объемная масса не будет достигнута, а межпоровые перегородки окажутся пронизанными трещинами. Это негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках материала.

В связи с этим ключевым этапом в управлении процессами вспучивания и структурообразования газобетонных смесей является балансировка скоростей этих процессов. В начале газовыделения пластично-вязкие свойства массы должны увеличиваться медленно, тогда как в конце – быстро. Качество всех процессов, происходящих в этот период, определяет основные эксплуатационные характеристики газобетона, поскольку именно в это время формируется поровая структура массивов, отвечающая за теплотехнические показатели, а также происходит уплотнение межпоровых перегородок, что влияет на конечную прочность материала.

Для формирования качественного массива к концу его созревания необходимо обеспечить оптимальное вспучивание смеси с образованием полидисперсного порового пространства и стабильность первично сформированной структуры материала. Достижения этого можно реализовать несколькими способами.

Процессы поризации массива непосредственно зависят от реотехнологических свойств ячеистобетонной смеси. Если полученная сырьевая суспензия обладает избыточной подвижностью (например, из-за избытка воды), выделяющийся газ будет беспрепятственно выходить из смеси в процессе вспучивания. Это приведет к осадке и уплотнению массива. В случае, если смесь окажется слишком жесткой, равномерное распределение образованных пор по объему будет затруднено, что приведет к их слиянию и образованию скоплений в различных зонах массива. В обоих случаях такие явления могут стать причиной получения некондиционного материала с низкими эксплуатационными характеристиками.

Своевременная фиксация сформированной поровой структуры также является важным фактором для получения качественного изделия. В настоящее время в качестве структуроформирующего компонента, обеспечивающего устойчивость массива в доавтоклавный период, используется цемент, который вводится в состав смешанного вяжущего. Однако автоклавная обработка цемента часто приводит к образованию нестабильных «переходных» форм силикатных соединений, таких

как α -гидрат двухкальциевого силиката, который в процессе кристаллизации захватывает гидроксид кальция. В дальнейшем этот гидроксид может отщепляться, что приводит к избытку свободной несвязанной извести в изделии и снижению прочности готового материала, в том числе из-за карбонизационных процессов.

Форма с готовым массивом смеси перемещается на трансбордер, который представляет собой передвижную платформу. С его помощью форма транспортируется на ударный стол, где массив смеси подвергается динамическому воздействию на ударной или вибрационной площадке в течение 10 мин, с определенной частотой и амплитудой. Этот процесс интенсифицирует процесс газовыделения в газобетонной смеси. В результате этого процесса уровень смеси в форме поднимается, что приводит к вспучиванию и формированию массива с пористой структурой.

На данной стадии производства (заливка смеси и поризация) разработан и предлагается для внедрения технологический прием управления формированием высокоорганизованной поровой структуры – физико-механическая обработка смеси виброгребнем на стадии после ее заливки [221]. Стержни виброгребня погружаются в смесь и путем перемещения формы со скоростью 12 м/мин под виброгребнем обеспечивают дробление пор воздухововлечения до размера менее 2 мм, сопоставимых с порами газовыделения. Этот процесс гарантирует получение высокопористой однородной структуры газобетона.

Виброгребень (рисунок 4.14) представляет собой порталную конструкцию, состоящую из порталных опор и поперечной балки. На поперечной балке подвешены вибростержни.

Для эффективного проектирования процесса вспучивания смеси необходимо достичь оптимальной вязкости, например, путем уменьшения ее с помощью тиксотропного разжижения. Явление тиксотропии заключается в разрушении слабых коагуляционных структур с помощью динамических воздействий и в переводе заземленной и частично адсорбированной воды в свободное состояние.

Кроме того, динамические воздействия в начале процесса гидратации способствуют разрушению коагуляционной структуры, разжижению смеси и последующему уплотнению межпорового вещества. Это помогает преодолеть энергетический барьер между частицами и способствует формированию кристаллической структуры. Уплотнение межпоровых перегородок снижает капиллярную пористость микроструктуры бетона, что важно для его теплопроводности, морозостойкости и долговечности.

После вспучивания форма перемещается в камеру предварительного твердения для созревания и набора пластической прочности. При литевой технологии это длится 3-4 ч. При ударной и вибрационной 1,5-2 ч. Данный временной интервал необходим для достижения оптимальной твердости массива, что является предварительным условием для безопасной распалубки.

Камера предварительного твердения (рисунок 5.2) представляет собой помещение с утепленным контуром.

Конструктивная схема камеры – железобетонная каркасная с заполнением из газобетонных блоков, утепленная по контуру. Стеновая ограждающая конструкция представлена двумя слоями: внутренний конструктивный слой из газобетонных блоков $D500$ и наружный утеплитель – газобетонные плиты $D100$. Перекрытие выполнено из металлического профильного настила по железобетонным балкам и снаружи по контуру утеплено газобетонными плитами $D100$. В камере поддерживается постоянная температура $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ при постоянной влажности 100% за счет выделения тепла и влаги из ячеистобетонных массивов. В камере твердения тележка-форма перемещается на тележку-трансбордер. Тележка-трансбордер передвигается вдоль камеры твердения по рельсовому пути, расположенному в прямке, и доставляет тележку-форму к месту ее стоянки на время предварительного твердения. На обратном пути тележка-трансбордер забирает тележку-форму, прошедшую процесс предварительного твердения, и перемещает ее к воротам (рольставни) и далее на пост кантования.

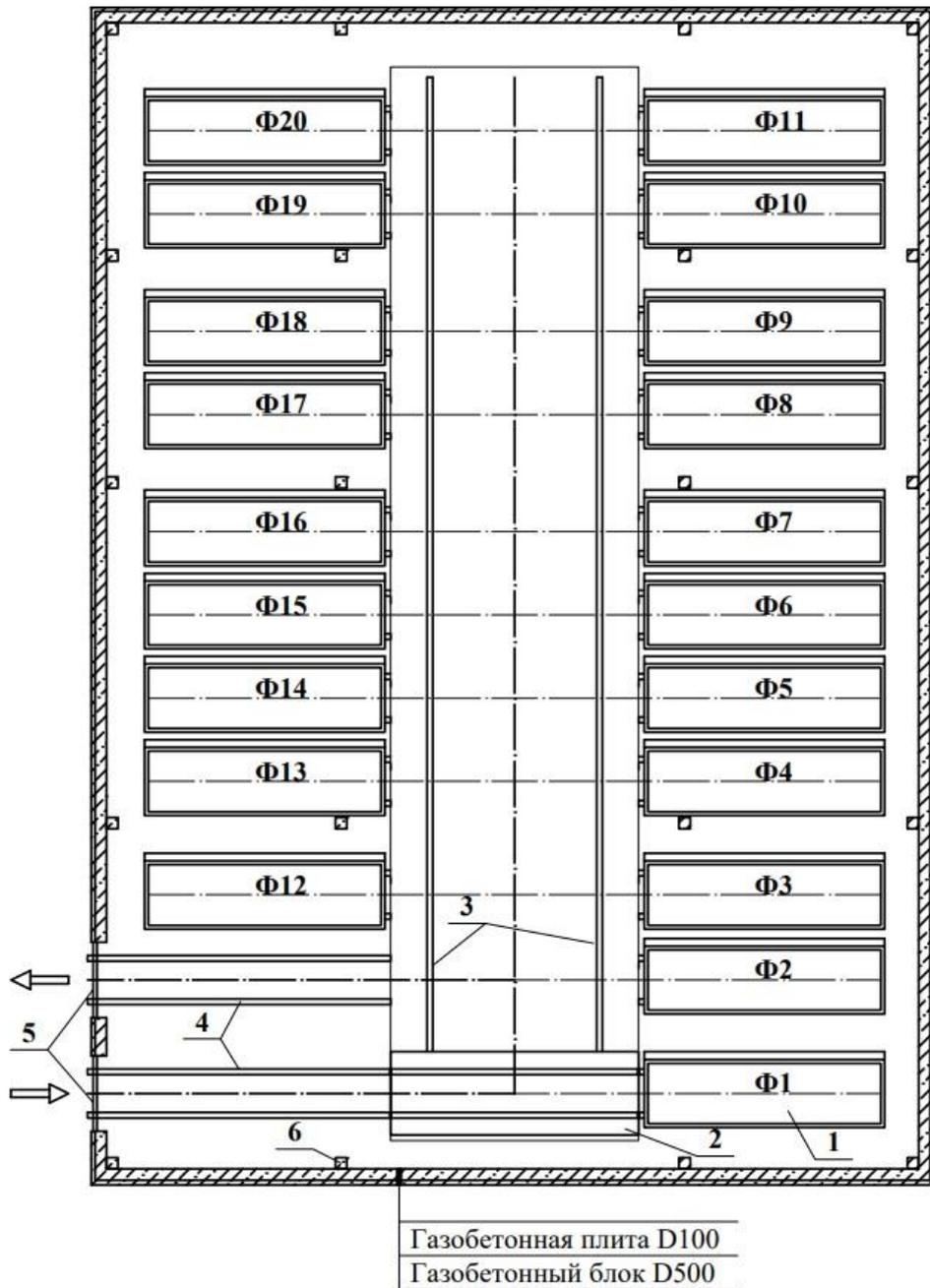
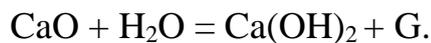


Рисунок 5.2 – Схема камеры предварительного твердения: 1 – тележка-форма, 2 – тележка-трансбордер, 3 – рельсовый путь тележки-трансбордера, 4 – рельсовый путь тележек-форм, 5 – рольставни, 6 – железобетонные колонны

В камере предварительного твердения происходит дальнейшее гашение извести:



Известь поглощает свободную воду, что приводит к нагреванию смеси и снижению ее подвижности. При повышенных температурах в массиве наблюдается увеличение пластической прочности. Массив достигает необходимого уровня

прочности для последующей резки. Формы перемещаются на стол резательной машины после того, как ячеистобетонное сырье достигает пластической прочности в диапазоне 15-25 кПа. Затем массив-сырец транспортируется на участок распалубки и в резательный комплекс.

В зоне кантования массив извлекается из формы на съемный борт. Затем подъемник захватывает форму для ее переворачивания на 90°. Зажимной рычаг, управляемый гидравлическим двигателем, немного ослабляет хватку, чтобы соединить разделенную панель и массив на транспортере. После этого пустая форма направляется обратно на конвейерную линию, где она готова для следующей операции заливки.

Массив перемещается на съемном борту, который используется в качестве поддона, в зону резки. Этот этап позволяет разделить массив на более мелкие блоки с требуемыми размерами и формами для последующего использования.

С помощью устройства предварительной резки газобетонный массив подвергается обрезке по длине, ширине и высоте, а также формируется профиль внутренних полостей, после чего массив разделяется на горизонтальные слои. Далее материал направляется на вторую резательную тележку, где автоматический механизм поперечной резки производит резку по высоте.

На этапах предварительной и поперечной резки отходы направляются в специальную емкость для отходов. Позднее они подвергаются повторной обработке и используются в производственном процессе в качестве обратного шлама.

Механические и энергетические параметры резания зависят от физико-механических свойств твердеющей газобетонной массы. Основной характеристикой массы является ее пластическая прочность, в зависимости от которой режущий орган испытывает определенное удельное сопротивление резанию. Закономерности изменения пластической прочности в период доавтоклавного твердения массива зависят от физико-механических свойств исходных материалов, пористости газобетона, условий созревания массива, в частности, от температуры среды. Для твердеющей газобетонной массы при этом

характерны определенные качественные этапы последовательных структурных изменений – от упруго-вязко-пластического состояния в период образования ячеистой структуры до ее упрочнения за счет образования кристаллизационных связей в коагуляционной структуре материала.

Очевидно, что каждому этапу соответствуют своя пластическая прочность массы и определенный характер ее разрушения, обуславливающий режим резания газобетона. Так, при механическом воздействии на коагуляционную структуру газобетона ее структурные связи разрушаются, и реологическая система переходит из упруго-вязкопластического состояния в упруго-вязкое. С окончанием формирования коагуляционной структуры и началом ее упрочнения благодаря созданию кристаллизационных связей газобетонная масса приобретает свойства тиксотропно разрушаться и восстанавливаться при механическом воздействии. Этому структурному состоянию массы обычно соответствует пластическая прочность в пределах $2,5-4,5 \cdot 10^4$ Па.

По мере увеличения количества кристаллизационных связей тиксотропные свойства материала проявляются только частично. Механическое воздействие при этом не приводит к полному разрушению структуры, которая в данном случае будет состоять из разрушенного пространственного каркаса и неразрушенных структурных элементов. Такой коагуляционно-кристаллической структуре соответствует пластическая прочность в пределах $6-8 \cdot 10^4$ Па. На основе приведенных данных можно сделать вывод о тесной взаимосвязи пластической прочности с характером разрушения сырца перед фронтом режущего органа.

К числу важнейших вопросов технологии изготовления изделий из бетонов автоклавного твердения относится установление оптимальных режимов автоклавной обработки с большими возможностями не только интенсификации производства, но и улучшения качества готовой продукции. В целях повышения экономической эффективности необходимо максимально сократить продолжительность запарки изделий в автоклаве. Автоклавная обработка позволяет вести направленный процесс образования гидросиликатов кальция. Ее следует рассматривать как средство технологического синтеза гидросиликатов

кальция из различных видов сырья. Наряду с этим в условиях повышенных давлений и температур кремнезем, содержащийся в песке и крупном заполнителе, превращается в активный компонент, который способен реагировать с известьсодержащими материалами и искусственными материалами цемента, создавая цементирующее вещество, скрепляющее заполнители.

Разрезанный массив транспортируется в автоклав, где происходит автоклавная обработка для ускоренного созревания при повышенном давлении в диапазоне от 0,8 до 1,3 МПа, и при температуре водяного пара в диапазоне от 175 до 191 °С, в течение 12 ч, из которых 1,5 ч занимает подъем давления и температуры и 1,5-2 ч – поэтапное снижение давления.

Исследованиями установлено, что основными составляющими цементирующего вещества, определяющими прочность, являются гидросиликаты и в меньшей степени гидроалюминаты и гидроферриты кальция.

Характер новообразований в системе $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ в процессе автоклавной обработки при различных температурах также подробно изучался многими учеными. А.В. Волженский отмечает, что при автоклавной обработке изделий на основе песка и извести первоначально в известково-песчаных смесях в результате медленного растворения кремнезема и наличия насыщенного раствора окиси кальция образуется $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. В дальнейшем в водном растворе наступают условия для образования гидросиликата кальция. Исследуя влияние автоклавной обработки (0,8 МПа) на твердение отдельных клинкерных минералов и цементов различного минералогического состава, П.И. Боженков, С.Л. Вольфсон установили, что при автоклавной обработке наибольший относительный прирост прочности имеют минералы, медленно твердеющие в нормальных условиях, т. е. для автоклавной обработки следует использовать материалы, богатые двухкальциевым силикатом.

По данным [199] прочность $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ после автоклавной обработки составляет 90% от прочности при нормальном твердении в течении 28 сут, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – 114%, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – 129 %, прочность же $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – 192 %.

Некоторыми учеными отмечается, что по мере повышения давления свыше 1,3 МПа прочность образцов из C_3S уменьшается, в то время как у C_2S растет и значительно превосходит по абсолютному значению прочность образцов из C_3S .

Последовательность и скорость образования гидросиликатов кальция при автоклавной обработке зависят от ряда факторов: степени измельчения исходных компонентов, параметров водяного пара, рН среды, наличия примесей, водотвердого отношения, вида исходного кремнезема и др. Изменение прочности силикатных изделий при гидротермальной обработке связано с образованием гидросиликатов кальция, которые обладают разной термодинамической стабильностью и способностью противостоять агрессивным средам, морозу и т.д.

После завершения автоклавной обработки газобетонных массивов-сырцов, готовые изделия подаются на роликовый транспортер с использованием крана-перекладчика. На этом этапе устанавливаются поддоны, на которых будут размещены газобетонные блоки. Производится отделение блоков друг от друга с целью предотвращения повреждений и обеспечения их безопасного транспортирования.

В конце станции деления блоков они снимаются с помощью крана-перекладчика. После этого блоки упаковываются термоусадочной пленкой при помощи роликового транспортера. Затем упакованные блоки доставляются к месту с помощью вилочного погрузчика, который снимает их с конвейера и транспортирует на склад готовой продукции. Этот процесс обеспечивает сохранность и целостность готовой продукции и ее готовность к последующей отгрузке и использованию.

5.2. Повышение теплотехнической однородности ограждающих конструкций из газобетонных блоков

В условиях применения газобетона как материала для ограждающих конструкций, ключевым аспектом является обеспечение теплотехнической однородности при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. Это особенно важно для повышения как энергетической, так и экономической

эффективности строительных решений. В данном контексте предложено использование двухрядной системы ячеистобетонной кладки, которая направлена на минимизацию теплопотерь через сквозные швы [222, 223].

Для комплексной оценки теплотехнических показателей стеновой конструкции, включающей газобетонные блоки, проведены как расчетные, так и экспериментальные исследования. Особое внимание уделено влиянию сквозных швов на теплопередачу через стеновые элементы. В расчетно-экспериментальной части работы были исследованы фрагменты кладки, включающие как участки с перевязкой блоков, так и участки с одним или двумя сквозными швами, что позволило детально проанализировать распределение тепловых потоков в различных конструктивных схемах.

Для проведения экспериментальной части были изготовлены модели кладки размером $250 \times 250 \times 50$ мм, представляющие собой два ряда газобетонных блоков, соединенных цементно-песчаным раствором. В моделях «а» и «в» (рисунок 5.3) исследовались участки с перевязкой блоков, в то время как модели «б» и «г» представляли собой системы с одним и двумя сквозными швами соответственно. Толщина всех швов составила 5 мм, что позволило учесть стандартные строительные условия при оценке теплотехнических свойств кладки.

Изучаемые фрагменты газобетонной кладки включают три типа однородных участков конструкции, которые были исследованы для оценки их теплотехнических характеристик:

- участок кладки со сквозным швом (рисунок 5.3, поз. 1);
- участок слоистой кладки, состоящий из двух вертикальных рядов газобетонных блоков, соединенных цементно-песчаным раствором (рисунок 5.3, поз. 2);
- участок с перевязкой швов блоков (рисунок 5.3, поз. 3).

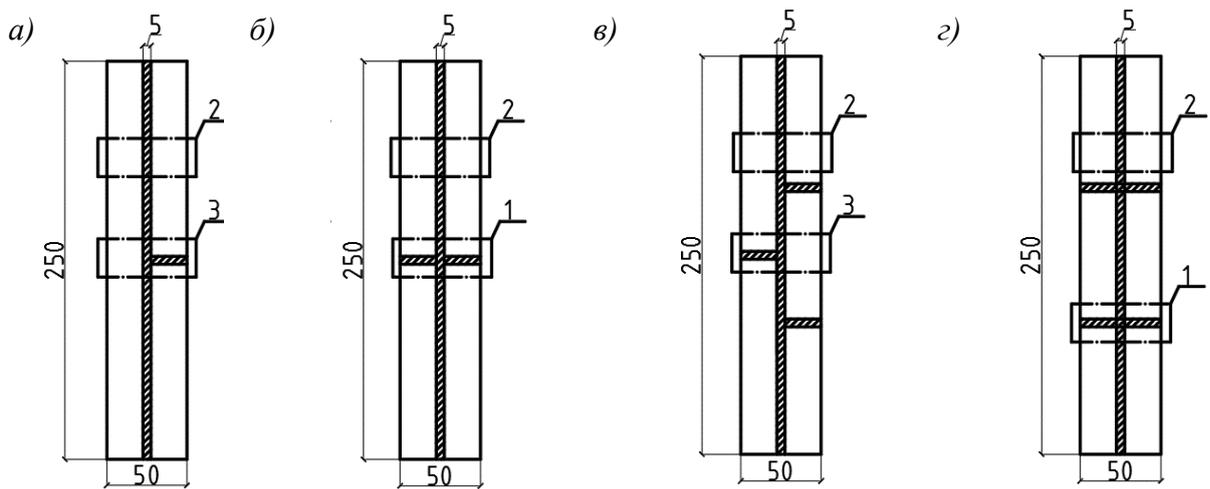


Рисунок 5.3 – Поперечные разрезы моделей кладки: *а* – в виде перевязки фрагментов блоков с одним несквозным швом; *б* – в виде одного сквозного шва; *в* – в виде перевязки фрагментов блоков с тремя несквозными швами; *г* – в виде двух сквозных швов; *1* – участок перевязки блоков; *2* – участок слоистой конструкции; *3* – участок в виде сквозного шва

Для детального анализа теплотехнических характеристик газобетонных конструкций и расчета их сопротивления теплопередаче был использован подход, учитывающий как однородные части кладки, так и влияющие на теплопередачу неоднородности, такие как швы и стыки. Сопротивление теплопередаче фрагментов конструкции рассчитывалось по следующей формуле [224]:

$$R'_{o} = \Sigma A_i / (\Sigma A_i / R_{o,i} + \Sigma L_j \psi_j + \Sigma N_k K_k) \quad (5.1)$$

где A_i – площадь конструкции i -го вида в рассматриваемом фрагменте, м^2 ; $R_{o,i}$ – сопротивление теплопередаче однородной части конструкции i -го вида, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; L_j – протяженность всех стыков j -го вида в рассматриваемом фрагменте, м ; ψ_j – дополнительные удельные линейные потери теплоты через стык j -го вида, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; N_k – число точечных теплотехнических неоднородностей k -го вида в рассматриваемом фрагменте, шт.; K_k – дополнительные удельные потери теплоты через точечную теплотехническую неоднородность k -го вида, $\text{Вт}/^\circ\text{C}$.

При расчетах учитывались теплопроводные включения в виде сквозных и перевязочных швов, выполненных с использованием тонкослойного клевого раствора и полиуретанового клея, поскольку их теплофизические характеристики значительно отличаются от характеристик газобетона. Наличие малой доли швов на единицу площади также оказывало влияние на общие теплотехнические

свойства конструкции. Поскольку в исследуемых фрагментах отсутствуют точечные теплотехнические неоднородности, то $\sum N_k K_k = 0$.

Экспериментальные исследования проводились с использованием прибора для измерения теплопроводности ИТП МГ-4 «100». Разница температур между холодильником и нагревателем во время экспериментов составляла 30 °С. Результаты расчетно-экспериментальной оценки приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов кладки со сквозными швами и участками перевязки представлены на рисунке 5.4.

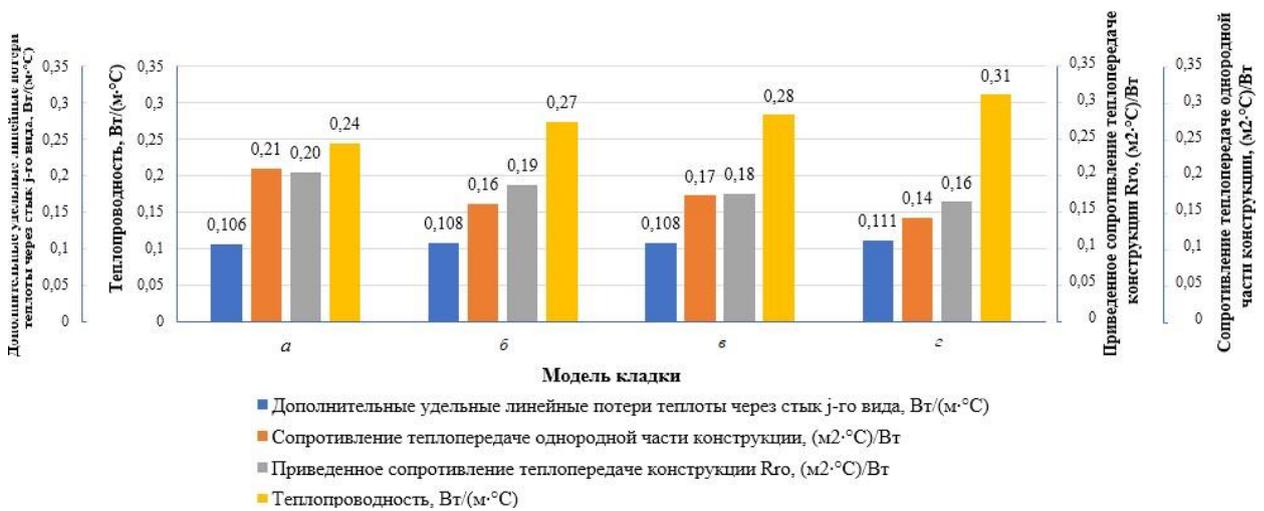


Рисунок 5.4 – Средние значения основных теплотехнических показателей моделей кладки: *а* – в виде перевязки фрагментов блоков с одним несквозным швом; *б* – в виде одного сквозного шва; *в* – в виде перевязки фрагментов блоков с тремя несквозными швами; *г* – в виде двух сквозных швов

Анализ данных, представленных на рисунке 5.5, показал, что модель кладки «а» обладает наилучшими теплотехническими характеристиками благодаря отсутствию сквозных швов, которые являются теплопроводными включениями. Ее эффективность выше на 10-30 % по сравнению с моделью «б», имеющей один сквозной шов. Модель кладки «в», содержащая три участка перевязки блоков, показала теплотехнические характеристики, сопоставимые с моделью «б», обладающей одним сквозным швом. Наименее энергоэффективной оказалась модель «г», чьи теплотехнические свойства уступают модели «в» на 10-25 %.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что сквозные швы в кладке из газобетонных блоков оказывают значительное влияние

на теплозащитные свойства ограждающей конструкции. Для минимизации этого влияния и улучшения теплотехнической однородности конструкции предлагается использовать полиуретановый клей в качестве заполнителя швов. Это позволяет существенно снизить теплопроводность кладки, повышая ее энергоэффективность. В рамках данного исследования были разработаны различные варианты кладок, в которых использовался полиуретановый клей для обеспечения прочного сцепления блоков, а также стеклокомпозитные стержни для повышения трещиностойкости и общей устойчивости конструкции.

Разработанные ограждающие конструкции из ячеистобетонных блоков [225, 226] обладают высокой прочностью и теплотехнической эффективностью благодаря применению полиуретанового клея и стеклокомпозитных стержней (рисунок 5.5, а). Блоки соединяются тонким слоем полиуретанового клея толщиной 1-3 мм, что минимизирует теплопроводность швов, обеспечивая высокую теплотехническую однородность всей конструкции. Вышележащие блоки надежно закрепляются на нижележащих блоках с помощью стеклокомпозитных стержней, которые забиваются на глубину 50 мм, проходя через весь блок. Эти стержни, расположенные на расстоянии $1/3$ длины блока от его тычковых сторон, обеспечивают дополнительную прочность конструкции.

Энергоэффективная кладка стен из ячеистобетонных блоков, фиксируемая по шву, представлена на рисунке 5.5, б. В данной конструкции каждый вертикальный и горизонтальный шов выполнен с использованием полиуретанового клея, что способствует улучшению плоскостности кладки и повышению ее трещиностойкости. В вертикальные швы вбиваются стеклокомпозитные стержни, длина которых на 50 мм превышает высоту блока, что позволяет дополнительно укрепить конструкцию и обеспечить ее стабильность. Размещение стержней на расстоянии $1/4$ от ложковых сторон блока способствует оптимальному распределению нагрузки и предотвращает образование трещин.

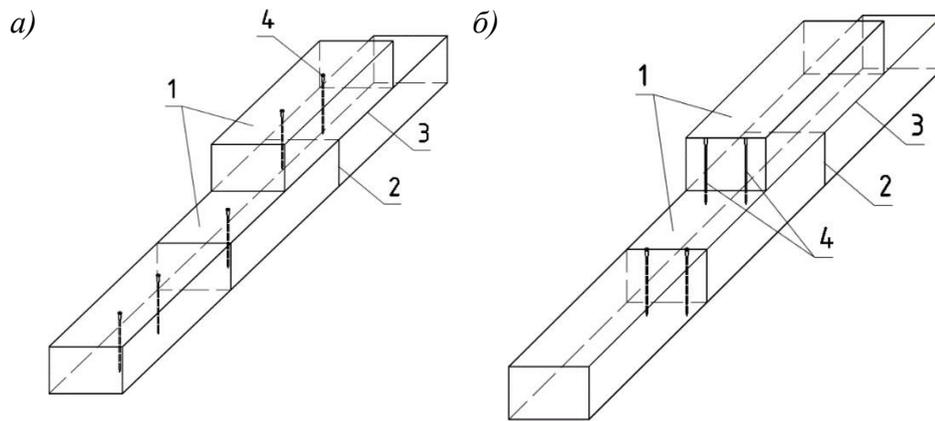


Рисунок 5.5 – Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией: *а* – по блоку; *б* – по шву; 1 – ячеистобетонные блоки; 2 – сквозной вертикальный шов; 3 – сквозной горизонтальный шов; 4 – стеклокомпозитный стержень

Для обоснования выбора материалов для заполнения швов и использования стержней, улучшающих деформативные свойства кладки, был проведен расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции с учетом теплопроводных включений (рисунок 5.6).

В расчет включены различные фрагменты газобетонной кладки из блоков *D400* размером $200 \times 400 \times 600$ мм, каждый из которых имеет площадь 1 м^2 . Первый фрагмент представляет собой однорядную кладку на тонкослойном клеевом растворе с толщиной шва 5 мм (рисунок 5.6, *а*). Второй фрагмент выполнен с использованием полиуретанового клея (рисунок 5.6, *б*), что позволяет минимизировать теплопроводность шва. Третий фрагмент – энергоэффективная кладка на полиуретановом клее с фиксацией блоков стеклокомпозитными стержнями (рисунок 5.6, *в*), способствующая улучшению деформативности и трещиностойкости. Четвертый фрагмент представляет энергоэффективную кладку с фиксацией стержнями по шву (рисунок 5.6, *г*), что дополнительно улучшает теплотехническую однородность и устойчивость конструкции.

Расчет приведенного сопротивления теплопередачи разработанных ограждающих конструкций и газобетонной кладки с поперечной перевязкой через ряд производился по формуле (5.1).

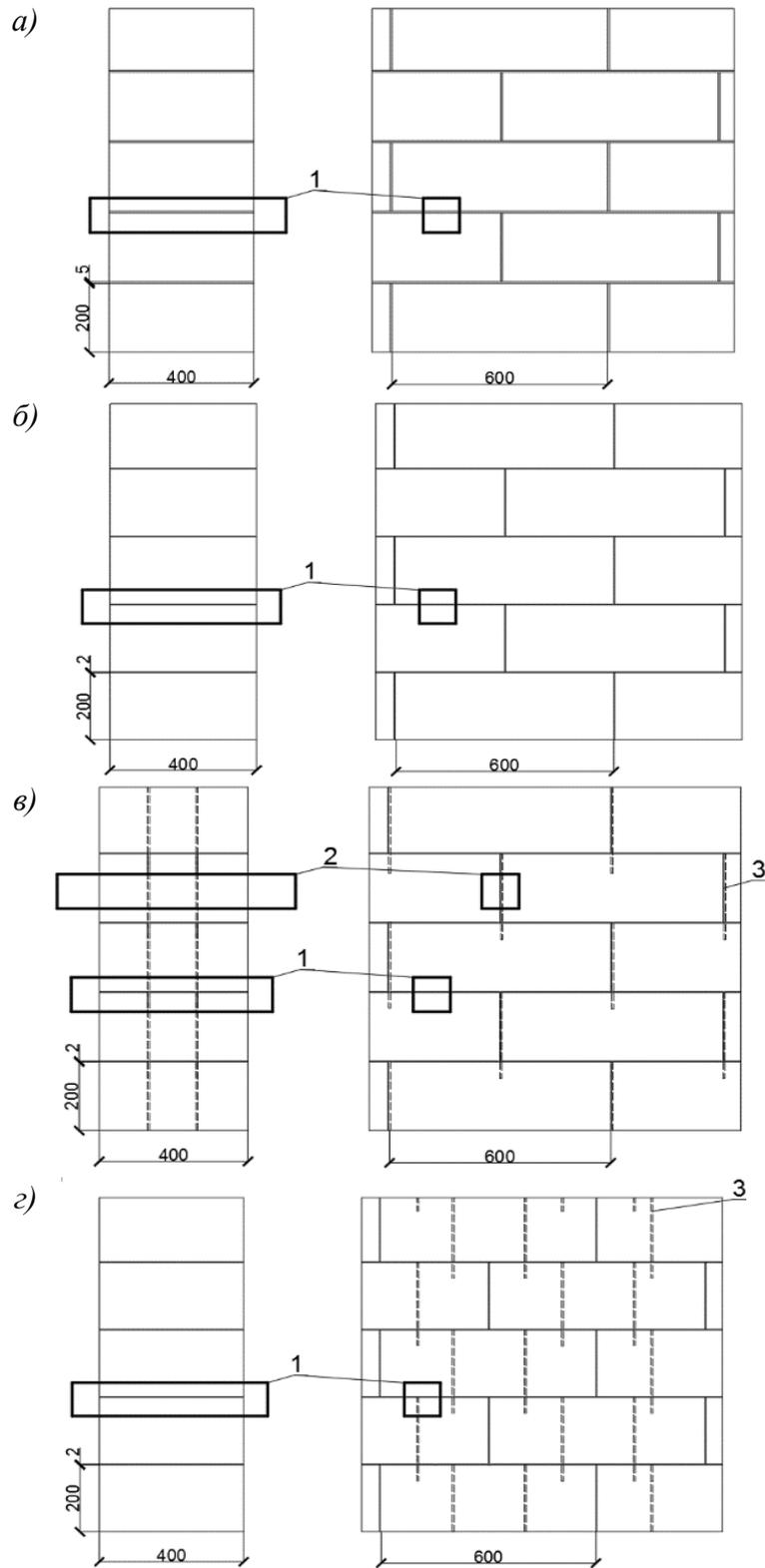


Рисунок 5.6 – Поперечный разрез и общий вид фрагментов однорядных кладок из газобетонных блоков для определения приведенного сопротивления теплопередаче: *а* – газобетонная кладка на цементном клеевом составе; *б* – газобетонная кладка на полиуретановом клее; *в* – газобетонная кладка на полиуретановом клее с фиксацией блоков; *г* – газобетонная кладка на полиуретановом клее с фиксацией блоков по шву; *1* – участок перевязки швов кладки; *2* – участок перевязки блоков кладки в виде сквозного вертикального шва со стеклокомпозитными стержнями; *3* – стеклокомпозитные стержни

Результаты расчетно-экспериментального исследования приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций из газобетонных блоков с различным заполнением сквозных швов представлены на рисунке 5.7.

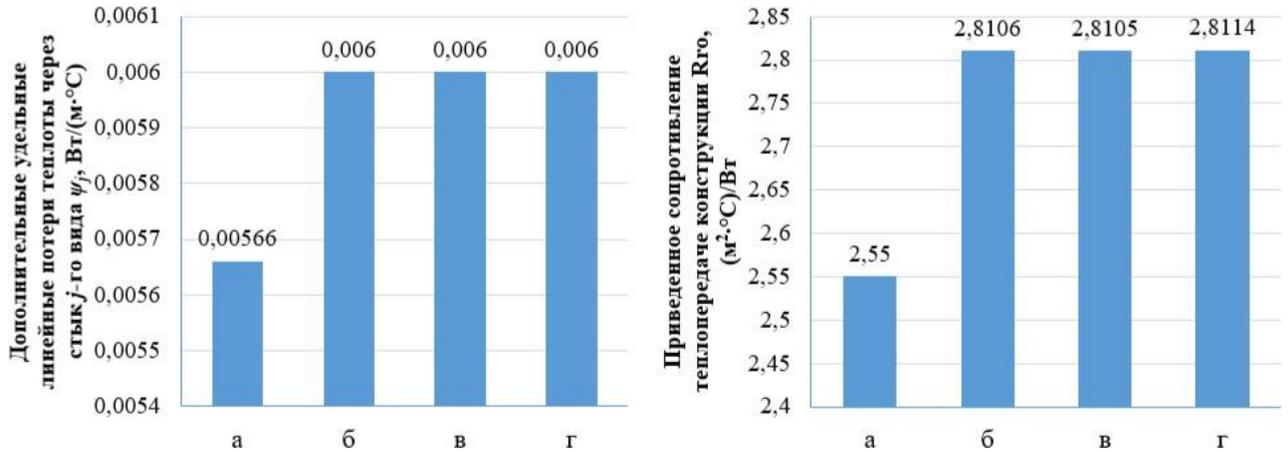


Рисунок 5.7 – Средние значения основных теплотехнических показателей исследования стеновых конструкций из ячеистобетонных блоков: *а* – однорядная кладка на тонкослойном клеевом растворе; *б* – однорядная кладка на полиуретановом клее; *в* – кладка на полиуретановом клее с фиксацией блоков стеклокомпозитными стержнями; *г* – кладка на полиуретановом клее с фиксацией блоков стеклокомпозитными стержнями по шву

Анализ результатов, представленных на рисунке 5.8, продемонстрировал, что разработанная энергоэффективная однорядная кладка стен обладает таким же высоким приведенным сопротивлением теплопередаче, как и традиционная газобетонная кладка, выполненная с использованием полиуретанового клея.

Стеклокомпозитные стержни, используемые в данной кладке, играют ключевую роль в обеспечении теплотехнической однородности конструкции. Эти стержни пронизывают кладку по всей высоте, что минимизирует влияние теплопроводных включений, таких как швы, на общие теплотехнические характеристики стен. Благодаря этому, кладка сохраняет свои теплоизоляционные свойства, обеспечивая равномерное распределение температуры по всей конструкции без значительных теплопотерь.

Кроме того, использование стеклокомпозитных стержней не только поддерживает теплотехническую однородность, но и способствует увеличению прочности и трещиностойкости конструкции. Это важно для несущих ограждающих конструкций, так как такие характеристики позволяют снизить риск

появления трещин и деформаций в процессе эксплуатации, что особенно критично в условиях переменных температурных и влажностных воздействий.

На разработанные виды кладок получены патенты на полезную модель (Приложение Г, Д).

Таким образом, применение разработанной энергоэффективной однорядной кладки стен, усиленной стеклокомпозитными стержнями, открывает возможности для ее использования в качестве несущей ограждающей конструкции, которая сочетает в себе высокие теплоизоляционные и механические свойства.

5.3. Экономическая эффективность автоклавного газобетона высокоорганизованной структуры

Экономическая эффективность производства изделий из автоклавного газобетона определялась способом сравнительной оценки базовых составов при сопоставлении приведенных затрат на производство 1 м³ газобетона.

Расчет экономической эффективности производства изделий из автоклавного газобетона с высокоорганизованной структурой плотностью 500 кг/м³ представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расчет стоимости материалов на изготовление 1 м³ газобетона (в ценах на февраль 2024 года)

Сырье и основные материалы	Единицы измерения	Цена за 1 кг, руб.	Норма расхода, кг	Сумма, руб.
Традиционный вариант				
Известь	кг	7,5	50	375
Цемент	кг	9	95	855
Песок	кг	0,3	325	97,5
Гипс полуводный	кг	4,9	2,5	12,25
Алюминиевая паста	кг	290	0,71	205,9
Вода	л	0,029	210	6,09
Итого:				1551,74
Разработанный вариант				
Известь	кг	7,5	43,4	325,5
Цемент	кг	9	82,5	742,1
Песок	кг	0,3	282,1	84,6
Гипс полуводный	кг	4,9	2,2	10,6
Алюминиевая паста	кг	290	0,6	178,7
Вода	л	0,029	182,3	5,3
Итого:				1346,91

Из таблицы 5.1 видно, что себестоимость 1 м³ газобетона автоклавного твердения с высокоорганизованной структурой ниже стоимости традиционного варианта.

Условно-годовой экономический эффект от производства изделий из автоклавного газобетона с высокоорганизованной структурой плотностью 500 кг/м³ при максимальной годовой производительности 100 000 м³, рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{max} = (C_{баз} - C_{проект}) \cdot B, \quad (5.2)$$

где $C_{баз}$ – стоимость 1 м³ газобетона по традиционному варианту, руб.; $C_{проект}$ – стоимость 1 м³ разработанного газобетона, руб.; B – годовая производительность (100 000 м³).

Годовая экономия составит:

$$\mathcal{E}_{max} = (1551,74 - 1346,91) \cdot 100\,000 = 18\,683\,000 \text{ руб.}$$

Изменение материальных затрат на производство 1 м³ газобетона автоклавного твердения с высокоорганизованной структурой при сравнении с традиционным вариантом составляет:

$$\frac{1551,74 - 1346,91}{1551,74} \cdot 100\% = 13,2\%$$

Таким образом, проведенные расчеты показали, что экономический эффект от обеспечения высокоорганизованной структуры газобетона на стадии формования, заливки и твердения с последующей автоклавной обработкой, заключается в снижении материальных затрат (по сравнению с традиционным вариантом) и составляет 18 683 000 руб. при годовой производительности 100 000 м³.

5.4. Внедрение и апробация результатов исследования

Для реализации результатов работы разработаны стандарт организации СТО 02066339-068-2023 «Газобетон с высокоорганизованной структурой» (Приложение Е) и Рекомендации по производству газобетона с высокоорганизованной структурой (Приложение Ж). Обоснована технико-экономическая эффективность модернизации технологии

производства, обеспечивающей получения газобетона с высокоорганизованной структурой *D500, B5*.

Промышленная реализация результатов исследования осуществлялась в ООО «Масикс» (г. Ростов-на-Дону), ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (д. Обухово, Калужская обл.), ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (г. Белгород).

Выпущенные мелкие стеновые блоки из конструкционно-теплоизоляционного автоклавного газобетона с высокоорганизованной структурой были использованы при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Песчаная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области. На указанном объекте газобетонные блоки использовались в качестве кладочных элементов наружной ограждающей конструкции.

Возведение наружного ограждения из газобетонных блоков представлено на рисунке 5.8.



Рисунок 5.8 – Возведение наружного ограждения из газобетонных блоков

Имеются акты о внедрении результатов диссертационной работы следующих предприятий:

- ООО «Масикс» (Ростов-На-Дону) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения (Приложение И);
- ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (Калужская обл.) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения (Приложение К);
- ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения (Приложение Л).

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 М).

5.5. Выводы

1. Предложено совершенствование технологической схемы производства газобетона за счет введения физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки и термосного метода в камере предварительного твердения. На основе выявленных теоретических положений об энергоэффективном формировании структуры в смесях автоклавного газобетона обоснованы параметры технологического процесса от стадии заливки смеси в формы до резки массива на изделия.

2. Разработан и предлагается для внедрения технологический прием управления формированием высокоорганизованной поровой структуры – физико-механическая обработка смеси виброгребнем на стадии после ее заливки. Стержни виброгребня погружаются в смесь и путем перемещения формы со скоростью 12 м/мин обеспечивают дробление пор воздухововлечения до размера менее 2 мм, сопоставимых с порами газовыделения. Этот процесс гарантирует получение высокопористой однородной структуры газобетона.

3. Разработаны однорядные ограждающие конструкции из ячеистобетонных блоков, обладающие высокой прочностью и теплотехнической эффективностью. За счет применения полиуретанового клея приведенное сопротивление теплопередаче стеновых ограждений на 10 % ниже аналогичных с заполнением швов тонкослойным клеевым раствором. А использование стеклокомпозитных стержней способствует увеличению сдвиговой жесткости кладки из ячеистобетонных блоков при равной теплотехнической обеспеченности.

4. Обоснована технико-экономическая эффективность от обеспечения высокоорганизованной структуры газобетона на стадии формования, заливки и

твердения с последующей автоклавной обработкой, способствующая снижению материальных затрат (по сравнению с традиционным вариантом) на 18 683 000 руб. при годовой производительности 100 000 м³.

5. Результаты исследований апробированы при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Песчаная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области на предприятии ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ», где было проведено возведение наружного ограждения из газобетонных блоков. Получены акты о внедрении результатов диссертационной работы следующих предприятий: ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ» (Белгород) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения; ООО «Масикс» (Ростов-На-Дону) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения; ООО «Сибирский элемент «Рента-К» (Калужская обл.) по производству изделий стеновых из газобетона автоклавного твердения. Для практического использования результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-068-2023 «Газобетон с высокоорганизованной структурой». Технические условия» и Рекомендации по производству газобетона с высокоорганизованной структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Развита теоретические представления о природе и видах дефектов газобетона, а также о формировании высокоорганизованной структуры газобетона, что позволило разработать научно обоснованное технологическое решение совершенствования процесса производства газобетона в доавтоклавный период – от стадии заливки смеси в формы до резки массива.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение газобетона высокоорганизованной структуры за счет: регулирования расхода извести, физико-механической обработки смеси виброгребнем после ее заливки, создания термосных условий в камере предварительного твердения. Изменение расхода извести позволяет регулировать термический потенциал газобетонной смеси из условия 1 кг/м³ СаО на 1 °С. Воздействие на газобетонную смесь виброгребня путем перемещения формы под ним со скоростью 12 м/мин обеспечивает дробление пор воздухововлечения до размера менее 2 мм, сопоставимого с порами газовыделения. Снижение градиента температур при создании термосных условий твердения до 12-15 °С приводит к достижению температуры поверхности массива порядка 54 °С, соответствующей значению на дне формы, что предотвращает образование сегментных пузырей. Совершенствование технологии газобетона обеспечивает повышение прочности на 50-60 % и снижение теплопроводности на 10-15 %.

Установлены условия формирования дефектов структуры – пор воздухововлечения и сегментных пузырей. Показано, что поры воздухововлечения, образовавшиеся во время заливки ячеистобетонной смеси, имеют форму перевернутой капли, характеризуемой тремя радиусами кривизны и высотой. Образование сегментных пузырей происходит в области максимума скорости гидратации извести, а условием их горизонтального перемещения является градиент тангенциальных сил в направлении повышенной асимметрии данного вида дефекта структуры, что приводит к выходу газа и оседанию смеси в форме или к нарушению структуры массива из-за разрывов сплошности.

Сформулированы теоретические основы получения газобетона высокоорганизованной структуры, раскрывающие влияние термических процессов (как интегрального тепловыделения, так и градиента температур) на снижение доли сегментных пузырей, как дефектов структуры, формируемых в доавтоклавный период. Процессы, протекающие в твердеющей газобетонной смеси, ранжированы по значимости вклада в создание температурного уровня: гидратация цемента → газовыделение за счет дисперсного алюминия → гидратация оксида кальция.

Предложено совершенствование технологической линии по производству автоклавного газобетона, заключающееся в регулировании содержания извести, введении физико-механической обработки смеси виброгребнем на стадии после ее заливки и применении термосного метода в камере предварительного твердения.

Обоснованное технологическое решение обеспечивает получение газобетона с высокоорганизованной макроструктурой по эксплуатационным свойствам превосходящего характеристики автоклавных газобетонов, произведенных по традиционной технологии, с обеспечением класса прочности *B5* при марке по плотности *D500*.

Разработаны мероприятия по повышению теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству газобетонов, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективой дальнейших исследований является исследование агрегативности ячеистобетонных смесей, выявление роли конгломератных образований в ячеистобетонной смеси на процесс формирования пористой структуры и установление значимости обратного термического градиента на этапе интенсивного тепловыделения в массиве при технологическом обеспечении получения газобетона высокоорганизованной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение Правительства РФ** от 31.10.2022 г. № 3268-р «О Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года (с изменениями на 29 ноября 2023 года)». – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2022. – № 45. – ст.7815.
2. **Баженов, Ю. М.** Бетон: технологии будущего / Ю. М. Баженов // Строительство. Новые технологии. Новое оборудование. – 2009. – № 8. – С. 29-32.
3. **Вернеке, Д.** Энергоэффективное строительство – это мировая тенденция / Д. Вернеке // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 10. – С. 40-41.
4. **Samchenko, S. V.** Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17.
5. **Бруяко, М. Г.** Ячеистые бетоны с вариатропной структурой на стадии формования изделия / М. Г. Бруяко, С. И. Баженова, З. Ву Ким // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 7. – С. 8-18.
6. **Кениг, Д.** Передовые технологии модернизации производства ячеистого бетона автоклавного твердения с использованием современного оборудования / Д. Кениг // Современный автоклавный газобетон: сборник докладов VI науч.-практ. конференции. – Москва. – 2022. – С. 59-68.
7. **Сажнев, Н. П.** Тенденции и перспективы развития технологий и расширение областей применения ячеистого бетона / Н. П. Сажнев // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Минск. – 2023. – С. 17-19.
8. **Robert, T.** EAACA – Net zero roadmap for autoclaved aerated concrete / T. Robert, K. Oliver, F. Clifford, W. Paweł // Proceedings in Civil Engineering: 7th

International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol. 6. – Issue 2. – P. 19-24.

9. **Paweł, W.** SOLBET: An example of an eco-friendly company / W. Paweł // Proceedings in Civil Engineering: 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol 6. – Issue 2. – P. 34-40.

10. **Paweł, W.** AAC life cycle: How long can autoclaved aerated concrete buildings be used / W. Paweł // Proceedings in Civil Engineering. 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol. 6. – Issue 2. – P. 41-45.

11. **Сулейманова, Л. А.** Газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства: монография / Л. А. Сулейманова, К. А. Кара. – Белгород: КОНСТАНТА, 2011. – 151 с.

12. **Пастушков, П. П.** Реализованный проект дома с однослойной ограждающей конструкцией из автоклавного газобетона класса энергосбережения «А» / П. П. Пастушков, Н. В. Павленко, Г. И. Гринфельд // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2020. – № 3-4 (254-255). – С. 20-21.

13. **Королев, А. С.** Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона / А. С. Королев, Е. А. Волошин, Б. Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 30-32.

14. **Строцкий, В. Н.** Анализ прочностных, деформационных теплотехнических характеристик автоклавного газобетона с учетом результатов испытаний изделий заводов производителей АГ для внесения возможных изменений / В. Н. Строцкий, А. В. Анцибор, А. А. Шеболдасов // Технологии бетонов. – 2023. – № 1(186). – С. 21-29.

15. **Кудяков, А. И.** Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой / А. И. Кудяков, И. А. Прищепа, С. П. Осипов // Строительные материалы. – 2022. – № 1-2. – С. 40-49.

16. **Стещенко, А. Б.** Управление структурообразованием поризованных цементных композиций при изготовлении теплоэффективных ограждающих

конструкций повышенного качества / А. Б. Стешенко, А. И. Кудяков, А. С. Иноземцев, С. С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – № 5. – С. 408-417.

17. **Погорелова, И. А.** Сухие строительные смеси для неавтоклавных ячеистых бетонов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Погорелова Инна Александровна. – Белгород, 2009. – 22 с.

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

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

20. **ГОСТ 31359-2007** Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.

21. **Гоманн, М.** Поробетон. Руководство / М. Гоманн; пер. с нем. под ред. А. С. Коломацкого. – Белгород: ЛитКараВан, 2010. – 272 с.

22. **Ванн Богелен, В.М.** Ключевая технология применения и производства армированного бетона автоклавного твердения / В. М. Ванн Богелен // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Минск: Стринко. – 2012. – С. 75-82.

23. **Трунин, Г. А.** Факторы риска применения ячеистого бетона автоклавного твердения на объектах малоэтажного строительства в России / Г. А. Трунин // Современный автоклавный газобетон: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2022. – С. 141-147.

24. **Семенов, А. А.** Предварительные итоги развития российского рынка стеновых материалов в 2021 году / А. А. Семенов // Современный автоклавный газобетон: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2022. – С. 9-11.

25. **Гринфельд, Г. И.** Рынок автоклавного газобетона России в 2021 г. Предварительные итоги / Г. И. Гринфельд // Современный автоклавный газобетон: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2022. – С. 5-8.

26. **Гринфельд, Г. И.** Рынок автоклавного газобетона России в 2022 г. / Г. И. Гринфельд // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Минск. – 2023. – С. 10-16.

27. **Аксенов, И. О.** Производство автоклавного газобетона в России в 2023 году. Особенности учета продукции в системе ОКПД2 / И. О. Аксенов, Г. И. Гринфельд // Современный автоклавный газобетон : Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2024. – С. 54-65.

28. **Bansal, Sid.** Production and use of AAC in India / Sid. Bansal, Sou. Bansal // Proceedings in Civil Engineering: 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – Prague. – 2023. – Vol 6. – Issue 2. – P. 1-4.

29. **Fouad, F.** Environmental performance of autoclaved aerated concrete in the USA / F. Fouad, W. Ramadan, T. Schoch, J. T. Kirby // Proceedings in Civil Engineering :7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol 6. – Issue 2. – P. 5-14.

30. **Фэнг, Д.** Новые тенденции рынка АГБ в Китае / Д. Фэнг, П. Лю, Н. С. Кондрашов // Современный автоклавный газобетон : Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Москва. – 2022. – С. 12-19.

31. **Русакович, В. В.** Состояние рынка блоков из ячеистого бетона в республике Беларусь / В. В. Русакович // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы XII Международной научно-практической конференции. – Минск. – 2023. – С. 7-9.

32. **Zapotoczna–Sytek, G.** Polish approach to the development of AAC properties and applications / G. Zapotoczna–Sytek, J. Małolepszy, M. Soboń // Proceedings in Civil

Engineering: 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol 6. – Issue 2. – P. 56-70.

33. **Clifford, F.** Assessment of durability of UK AAC blocks taken from walls of buildings / F. Clifford, S. Graham // Proceedings in Civil Engineering: 7th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2023. – Vol 6. – Issue 2. – P. 115-118.

34. URL: <https://exactitudeconsultancy.com/ru/reports/7441/autoclaved-aerated-concrete-aac-market.html>

35. **Бутт, Ю. М.** Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – С. 340-367.

36. **Бутт, Ю. М.** Исследование коллоидных растворов, образующихся при гидратации портландцемента в пасте / Ю. М. Бутт, Г. В. Топильский, Т. П. Васина, Т.А. Букатина // Твердение цемента: Тезисы докладов и сообщений Всесоюзного совещания. – Уфа. – 1974. – С. 98-100.

37. **Волженский, А. В.** Минеральные вяжущие вещества / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М.: Стройиздат, 1979. – С. 260-323

38. **Гранковский, И. Г.** Формирование дисперсной структуры минеральных вяжущих систем / И. Г. Гранковский // Гидратация и твердение цемента: Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Кн. 2. – С. 189-191

39. **Зонтаг, Г.** Коагуляция и устойчивость дисперсных систем / Г. Зонтаг, К. Шеренге; пер. с нем. и ред. О. Г. Усыярова. – Ленинград: Химия, 1973. – 149 с.

40. **Калоусек, Г. Л.** Процессы гидратации на ранних стадиях твердения цемента / Г. Л. Калоусек // Гидратация и твердение цемента : Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Кн. 2. – С. 65-79

41. **Лохер, Ф. В.** Исследования механизма гидратации / Ф. В. Лохер, В. Рихартц // Гидратация и твердение цемента : Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Кн. 2. – С. 122-133.

42. **Мчедлов-Петросян, О. П.** Термодинамика и термохимия цемента / О. П. Мчедлов-Петросян, В. И. Бабушкин // Гидратация и твердение цемента: Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – Кн. 1. – С. 6-16.

43. **Мчедлов-Петросян, О. П.** Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. М. Урженко. – М.: Стройиздат, 1984. – 225 с.

44. **Фомина, Е. В.** Особенности твердения композиционных вяжущих в технологии автоклавных ячеистых материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Фомина Екатерина Викторовна. – Белгород, 2007. – 174 с.

45. **Байков, А. А.** Тепловые явления при схватывании и твердении портландцемента / А. А. Байков, Н. Богданов // Цемент, его производство и применения. – 1906. – № 7-12. – С. 98-105.

46. **Киреенко, И. А.** Бетонные работы на морозе / И. А. Киреенко. – Киев: Укр. нар. ком. зем., 1918. – 59 с.

47. **Lerch, W.** Journal of research of the national bureau of standards / W. Lerch, R.H. Vogue. – Washington. – 1934. – Vol. 12. – P. 645–664.

48. **Кинд, В. А.** Теплота твердения портландцементов различного химического состава / В. А. Кинд, С. Д. Огороков, С. Л. Вольфсон // Цемент, его производство и применения. – 1937. – № 7. – С. 12–17.

49. **Огороков, С. Д.** Тепловыделение портландцемента / С. Д. Огороков, С. Л. Вольфсон // Промышленность строительных материалов. – 1940. – № 8. – С. 23–25.

50. **Огороков, С. Д.** Взаимодействие минералов портландцементного клинкера в процессе твердения цемента / С. Д. Огороков. – Ленинград, 1945. – С. 33–36.

51. **Стейнор, Г.** Реакции и термохимия гидратации цемента при обычной температуре / Г. Стейнор // Гидратация и твердение цемента: Труды III Международного конгресса по химии цемента. – 1958. – С. 177–201.

52. **Венюа, М.** Влияние повышенных температур и давлений на гидратацию и твердение цемента / М. Венюа // Гидратация и твердение цемента: Труды VI Международного конгресса по химии цемента. –1976. – С. 109-128.

53. **Кондо, Р.** Кинетика и механизм гидратации цемента / Р. Кондо, Ш. Уэда // Гидратация и твердение цемента: Труды VI Международного конгресса по химии цемента. – 1973. – С. 185-206.

54. **Ушеров–Маршак, А.В.** Калориметрия цемента и бетона. Избранные труды / А. В. Ушеров-Маршак. – Харьков: Факт, 2002. – 183 с.

55. **Венюа, М.** Цементы и бетоны в строительстве / М. Венюа; пер. с франц. Ф. М. Иванова, Д. В. Свеницкого. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.

56. **Тарасов, А. С.** Повышение эффективности пенобетона за счет внутреннего энергетического потенциала: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Тарасов Александр Сергеевич. – Белгород, 2007. – 201 с.

57. **Lesovik, V. S.** Heat evolution features of cement hydration in foamed concrete / V. S. Lesovik, A. S. Tarasov, A. A. Korotaeva // Aktualne problemy naukowe - badawcze budownictwa VIII Konferencje Naukowo-Techmiczna. – 2006. – P. 245-251.

58. **Lesovik, V. S.** Thermal processes in foamed concrete / V. S. Lesovik, A. S. Tarasov // Ibausil International Conference on Building Materials. – 2006. – P. 957-963.

59. **Бондаренко, П. Н.** Тепловыделение цемента в бетоне из электроразогретой смеси: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бондаренко Павел Николаевич. – Новосибирск, 1984. – 226 с.

60. **Лукьянов, В. С.** Исследование тепловыделения цементов в термосном калориметре ЦНИИСа / В. С. Лукьянов, А. Р. Соловьянчик // Сборник докладов «Методы экспериментального определения и расчета тепловыделения в бетоне». – 1971. – С. 45-58.

61. **Carlson, R. W.** Correlation of methods for measuring heat of hydration of cement / R. W. Carlson, L. R. Forbrich // Industrial and engineering chemistry. Analytical addition. – 1938. – Т. 10. – P. 382-386.

62. **Rastrup, E.** Heat of hydration in concrete / E. Rastrup // Magazine of concrete research. – London. – 1954. – Vol. 6. – Т. 17. – P. 79-92.

63. **Запорожец, И. Д.** Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окорочков, А. А. Парийский. – М.: Стройиздат, 1966. – 314 с.

64. **Запорожец, И. Д.** К вопросу о температурной функции тепловыделения бетона / И. Д. Запорожец, А. А. Парийский, С. Д. Окорочков, Л. И. Чумадова. – М.: Бетон и железобетон. – 1977. – № 6. – С. 24-25.

65. **Заседателев, И. Б.** Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений / И. Б. Заседателев, В. Г. Петров-Денисов. – М.: Стройиздат, 1973. – 167 с.

66. **Шаркунов, С. В.** Экспериментальный метод исследования тепловыделения бетона в адиабатических условиях / С. В. Шаркунов, А. С. Магитон // Сборник докладов «Методы экспериментального определения и расчета тепловыделения в бетоне». – 1971. – С. 29-36.

67. **Александровский, С. В.** Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 432 с.

68. **Гвоздев, А. А.** Температурно-усадочные деформации в массивных бетонных блоках / А. А. Гвоздев. – М.: Изв. АН СССР ОТН. – 1953. – № 4. – С. 493-502.

69. **Парийский, А. А.** Метод экспериментального определения тепловыделения цемента в условиях изотермического твердения растворов и бетонов / А. А. Парийский // Сборник докладов «Методы экспериментального определения и расчета тепловыделения в бетоне». – М.: ВНИПИ Теплопроект. – 1971. – С. 14-28.

70. **Плятт, Ш. Н.** Распределение температуры в бетонных массивах в строительный период / Ш. Н. Плятт, Л. В. Сапожников // Инженерно-физический журнал. – 1964. – № 7. – С. 65-72.

71. **Еременок, И. П.** Влияние температуры на тепловыделение цемента, прочность и модуль упруго-мгновенных деформаций бетона / И. П. Еременок // Труды координационного совещания по гидротехнике. – 1962. – Вып. 4. – С. 230-248.

72. **Марьямов, Н. Б.** Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н. Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

73. **Заседателев, И. Б.** Тепло- и массоперенос в бетоне специальных промышленных сооружений / И. Б. Заседателев, В. Г. Петров-Денисов. – М.: Стройиздат, 1973. – 167 с.

74. **Бабушкин, В. И.** Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под общ. ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1965. – 352 с.

75. **Рахимбаев, Ш. М.** О природе индукционного периода при гидратации вяжущих веществ / Ш. М. Рахимбаев // Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсосбережение в условиях рыночных отношений: Материалы Международной конференции. – Белгород. – 1997. – Ч.5 – С. 7-9.

76. **Поспелова, М. А.** Регулирование кинетики твердения цементных систем химическими добавками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Поспелова Марина Алексеевна. – Белгород, 2003. – 129 с.

77. **Bentz, D. P.** Prediction of adiabatic temperature rise in conventional and high-performance concretes using a 3-D microstructural model / D. P. Bentz, V. Waller, F. De Larrard // Cement and Concrete Research: Elsevier Science Ltd, USA. – 1998. – Vol. 28. – No.2. – Pp. 285-297.

78. **Марьямов, Н. Б.** Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н. Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 273 с.

79. **Левин, С. Н.** Основы технологии и физико-химических свойств вибровспученного силикатного ячеистого бетона / С. Н. Левин, А. П. Меркин, Г. Я. Амханицкий // Совещание по химии, технологии и применению в строительстве автоклавных силикатных материалов. – 1962. – С. 58-63.

80. **Баранов, А. Т.** Повышение качества ячеистых бетонов путем улучшения их структуры / А. Т. Баранов, Е. М. Чернышов, А. М. Крохин // Бетон и железобетон. – 1977. – № 1. – С. 9-11.

81. **Баранов, А. Т.** К вопросу прочности и долговечности ячеистых бетонов / А. Т. Баранов, Р. И. Бахтияров, О. Д. Бобров // Бетон и железобетон. – 1962. – № 9. – С. 18-20.

82. **Берг, О. Я.** Физические основы прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1961. – 490 с.

83. **Боженев, П. И.** Технология автоклавных материалов / П. И. Боженев. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. – 368 с.

84. **Вознесенский, В. А.** Однородность как критерий оценки качества бетона / В. А. Вознесенский, Ю. П. Должиков, В. Г. Лапин. – Кишинев: НЭИНТИ, 1967. – С. 6-9.

85. **Волженский, А. В.** Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства) : учебник для вузов / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.

86. **Горлов, Ю. П.** Технология теплоизоляционных материалов / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, А. А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 339 с.

87. **Горяйнов, К. Э.** Технология теплоизоляционных материалов и изделий / К. Э. Горяйнов, С. К. Горяйнова. – М.: Стройиздат, 1982. – 374 с.

88. **Зейфман, М. И.** Изготовление силикатного кирпича и силикатных ячеистых материалов / М. И. Зейфман. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.

89. **Меркин, А. П.** Некоторые вопросы теории и практики формирования макроструктурных ячеистых бетонов / А. П. Меркин, А. П. Филин, Д. Г. Земцов // Строительные материалы. – 1963. – № 2. – С. 36-38.

90. **Миронов, С. А.** Бетоны автоклавного твердения / С.А. Миронов, М.Я. Кривицкий, Л.А. Малинина [и др.]. – М.: Стройиздат, 1968. – 279 с.

91. **Кудряшев, И. Т.** Ячеистые бетоны / И. Т. Кудряшев, В. П. Куприянов. – М.: Госстройиздат, 1959. – 182 с.

92. **Куннос, Г. Я.** Элементы технологической механики ячеистых бетонов / Г. Я. Куннос, В. Х. Лапса, Б. Я. Линденберг, [и др.]. – Рига: Зинатне, 1976. – 95 с.

93. **Левин, Н. И.** Механические свойства блоков из ячеистых бетонов / Н. И. Левин. – М.: Госстройиздат, 1961. – 118 с.

94. **Кривицкий, М. Я.** Ячеистые бетоны (технология, свойства и конструкции) / М. Я. Кривицкий, Н. И. Левин, В. В. Макаричев. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 137 с.

95. **Меркин, А. П.** Научные и практические основы улучшения структуры и свойств поризованных бетонов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Меркин Адольф Петрович. – М., 1971. – 290 с.

96. **Меркин, А. П.** Формирование макроструктуры ячеистых бетонов / А. П. Меркин, А. П. Филин, Д. Г. Земцов // Строительные материалы. – 1963. – № 12. – С. 16-17

97. **Меркин, А. П.** Непрочное чудо / А. П. Меркин, П. Р. Таубе. – М.: Химия, 1983. – 224 с.

98. **Пинскер, В. А.** Некоторые вопросы физики ячеистого бетона / В. А. Пинскер. – Л.: Стройиздат, 1963. – 121 с.

99. **Пинскер, В. А.** Влияние пористой структуры на деформативно-прочностные свойства ячеистых бетонов / В. А. Пинскер // Физико-химическая механика дисперсных материалов. – Минск. – 1969. – С. 49-51.

100. **Пинскер, В. А.** Экспериментально-теоретические исследования влияния плотности на прочность и модуль упругости автоклавных ячеистых бетонов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Пинскер Вадим Аронович. – Л., 1980. – 141 с.

101. **Пинскер, В. А.** Опытная проверка пластичности автоклавного ячеистого бетона при кратковременном нагружении / В. А. Пинскер, В. С. Писарев // Применение ячеистых бетонов в жилищно-гражданском строительстве. – Л.: ЛенЗНИИЭП. – 1991. – С. 31-44.

102. **Сажнев, Н. П.** Производство ячеистых бетонов в Беларуси на современном этапе / Н. П. Сажнев // Белорусский строительный рынок. – 2011. – № 5. – С. 8-16.

103. **Сажнев, Н. П.** Производство ячеистобетонных изделий: теория и практика / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич, Л. В. Соколовский. – Минск: Стринко, 1999. – 284 с.

104. **Сахаров, Г. П.** Образование оптимальной структуры ячеистого бетона / Г. П. Сахаров, П. Б. Корниенко // Строительные материалы. – 1973. – № 10. – С. 26-28.

105. **Сахаров, Г. П.** Повышение стойкости ячеистого бетона на груболомом песке при кратковременном и длительном нагружении / Г. П. Сахаров, К. И. Попов, С. С. Батаев // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов: Тезисы докладов III Республиканской конференции. – Таллин: НИИ строительства Госстроя ЭССР. – 1978. – С. 61-65.

106. **Сахаров, Г. П.** Технологические способы повышения надежности из ячеистого бетона / Г. П. Сахаров, [и др.] // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов: Тезисы докладов IV Республиканской конференции. – Таллин. – 1981. – С. 38-43.

107. **Силаенков, Е. С.** Долговечность изделий из ячеистых бетонов / Е. С. Силаенков. – М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.;

108. **Солодовник, А. Б.** Континуальная модель вспучивания жидкости с пузырьками: дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Солодовник Анатолий Борисович. – Рига, 1968. – 135 с.

109. **Федин, А. А.** Совершенствование технологии и устранение брака в производстве газосиликатных изделий / А. А. Федин, Е. М. Чернышов // Строительные материалы. – 1962. – № 4. – С. 25-28.

110. **Федин, А. А.** Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона / А. А. Федин. – М.: Изд-во ГАСИС, 2002. – 264 с.

111. **Эскуссон, К. К.** Использование зол и шлаков в производстве ячеистых бетонов за рубежом / К. К. Эскуссон // Строительные материалы. – 1993. – № 8. – С. 18.

112. **Лесовик, В. С.** Геоника. Предмет и задачи: монография / В. С. Лесовик - 2-е изд., доп. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 218 с.

113. **Лесовик, В. С.** К вопросу получения высокопрочного газобетона / В. С. Лесовик, М. Ю. Елистраткин, М. В. Абсиметов, Е. В. Когут // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3(32). – С. 11-20.

114. **Танг, В. Л.** Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов / В. Л. Танг, Д. Л. Фам, Б. Б. Нгуен // Строительные материалы. – 2023. – № 11. – С. 63-69.

115. **Строкова, В. В.** Управление процессами синтеза строительных материалов с учетом типоморфизма сырья / В. В. Строкова // Строительные материалы. – 2004. – № 9. – С. 53.

116. **Логинов, Г. И.** Оптимальное распределение пор по размерам в ячеистых бетонах / Г. И. Логинов, А. П. Филин // Материалы II конф. по ячеистым бетонам. – Саратов: Приволжскоргтехстрой, 1965. – С. 50-52.

117. **Ухова, Т. А.** Настоящее и будущее ячеистых бетонов в России [Электронный ресурс] / Т. А. Ухова // Весь Бетон. 10. 03.21. URL: <https://allbeton.ru/article/69.html>.

118. **Чернышов, Е. М.** Управление процессами структурообразования и качеством силикатных автоклавных материалов: (вопросы методологии, структурное материаловедение, инж.-технол. задачи): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Чернышов Евгений Михайлович. – Л., 1988. – 45 с.

119. **Чернышов, Е. М.** Оптимизация структуры пористости ячеистых бетонов с использованием прогностических возможностей искусственных нейронных сетей / Е. М. Чернышов, Е. И. Дьяченко // Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве

на пороге XXI века: сб. докладов. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ. – 2000. – Ч. 2. – С. 453-458.

120. **Бахтияров, К. И.** Исследование влияния качества пористой структуры и межпустотного материала на физико-механические свойства ячеистого бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Бахтияров Камиль Ибрагимович. – М., 1966. – 14 с.

121. **Бугрим, С. Ф.** Исследование физической структуры цементного камня и бетона с целью повышения их стойкости к воздействию низких температур: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Бугрим Степан Федорович. – М., 1977. – 417 с.

122. **Пылаев, А. Я.** Исследование процесса вспучивания свойств газосиликата: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Пылаев Александр Яковлевич. – Ростов-на-Дону, 1977. – 189 с.

123. **Терентьев, А. Е.** Гипотеза оптимальной структуры ячеистого бетона. I-Упаковки сферических частиц / А. Е. Терентьев, В. С. Саканян // Технологическая механика бетона: Сб. научн. тр. – Рига: РПИ. – 1986. – С. 30-38.

124. **Филатов, А. Н.** Технологические основы производства высокоэффективных теплоизоляционных изделий «Газосиликат-200»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Филатов Анатолий Николаевич. – Киев, 1982. – 21 с.

125. **Чернов, А. Н.** Ячеистый бетон переменной плотности / А. Н. Чернов. – М.: Стройиздат, 1972. – 127 с.

126. **Шумков, А. И.** Исследование некоторых вопросов формирования пористой структуры ячеистых бетонов и путей ее улучшения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.484 / Шумков Алексей Иванович. – М., 1970. – 13 с.

127. **Любомирский, Н. В.** Процессы структурообразования газобетона неавтоклавного твердения при принудительном взаимодействии с углекислым газом / Н. В. Любомирский, Е. Ю. Николаенко, В. В. Николаенко, А. С. Бахтин // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 11 (63). – С. 89-96.

128. **Лотов, В. А.** Контроль процесса формирования структуры пористых материалов / В. А. Лотов // Строительные материалы. – 2000. – № 9. – С. 60-62.
129. **Шейкин, А. Е.** Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – М.: Стройиздат. – 1979. – 344 с.
130. **Kramer, Ch.** Threephase-foams for foam concrete application / Ch. Kramer, M. Schauerte, T.L. Kowald, R.H.F. Trettin // Materials Characterization. – 2015. – No 102. – P. 173-179.
131. **Anders, N.** Investigations about porosity analyzing of AAC / N. Anders // 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. – 2018. – P. 141-145.
132. **Сулейманов, К. А.** Виды пор в ячеистом бетоне / К. А. Сулейманов // IV Международный студенческий строительный форум – 2019: Сборник докладов. – Белгород: Изд-во БГТУ. – 2019. – С. 335-338.
133. **Пауэрс, Т. К.** Физические свойства цементного теста и камня / Т.К. Пауэрс // Химия цементов. – М.: Стройиздат. – 1969. – С. 300-319.
134. **Вишневский, А. А.** Выбор технологии производства автоклавного газобетона: ударная или литевая / А. А. Вишневский, Г. И. Гринфельд // Строительные материалы. – 2015. – №8. – С. 4-7.
135. **Лабунцов, Д. А.** Механика двухфазных систем / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов. – М.: МЭИ, 2000. – 374 с.
136. **Кафтаева, М. В.** Теория и практика ячеистых бетонов автоклавного твердения: монография / М. В. Кафтаева, Г. Маличенко, О. А. Скороходова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 150 с.
137. **Маличенко, Г.** Возникновение дефектов в газобетоне до его автоклавной обработки / Г. Маличенко, М. В. Кафтаева // Современное производство автоклавного газобетона: Материалы научно-практической конференции. – Санкт-Петербург. – 2011. – С. 40-46.
138. **Кафтаева, М. В.** К вопросу о трещинообразовании в автоклавных газобетонах / М. В. Кафтаева // Университетская наука. – 2020. – № 2(10). – С. 74-78.

139. **Федин, А. А.** Совершенствование технологии и устранение брака в производстве газосиликатных изделий / А. А. Федин, Е. М. Чернышов // Строительные материалы. – 1962. – № 4. – С. 25-28.

140. **Осадчук, А. А.** Изучение трещинообразования в ячеистых газобетонах / А. А. Осадчук, С. В. Беденко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – С. 2560-2565.

141. **Легостаева, Н. В.** Анализ причин возникновения дефектов в газобетоне в процессе его формования / Н. В. Легостаева // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 4(27). – С. 91-97.

142. **Кафтаева, М. В.** Микроструктура автоклавных газосиликатов и влияние на нее гипсового камня / М. В. Кафтаева, Ш. М. Рахимбаев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 34-41.

143. **Ухова, Т. А.** Применение комплексных добавок на основе СП в технологии ячеистых бетонов / Т. А. Ухова, Л. С. Усова // Бетон с эффективными модифицированными добавками. – 1985. – С. 56-60.

144. **Барковец, А. П.** Добавки в производстве ячеистых бетонов / А. П. Барковец // Промышленность строительных материалов Москвы. – 1985. – № 4. – С. 18-19.

145. **Авторское свидетельство 135809 СССР.** Способ изготовления изделий из ячеистых бетонов / А.И. Чернов [и др.] // Бюллетень изобретений. – 1961. – № 3. – С. 40.

146. **Хигерович, М. И.** Интенсификация изготовления ячеистых бетонов путем применения вибрирования / М. И. Хигерович, А. П. Меркин. – М.: Стройиздат, 1961. – 16 с.

147. **Христюк, А. С.** Использование эффекта периодического деформирования в процессе вспучивания газобетонной смеси: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Христюк Александр Степанович. – М., 1973. – 139 с.

148. **Авторское свидетельство 802026 (СССР).** Способ изготовления изделий из ячеистобетонных смесей / Э.А. Курносов // Бюллетень изобретений. – 1981. – № 5.

149. **Авторское свидетельство 669588 (СССР).** Способ изготовления изделий из ячеистобетонной смеси / К.Э. Горяйнов, [и др.] // Бюллетень изобретений. – 1979. – № 23.

150. **Домбровский, А. В.** Исследование ударной технологии формования ячеистобетонных изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Домбровский Александр Васильевич. – М., 1980. – 280 с.

151. **Гусев, Б. В.** Технологические особенности формования изделий из смесей тяжелого и ячеистого бетона способами ассиметрических колебаний и ударами / Б. В. Гусев, А. В. Домбровский // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докл. и Всесоюз. симпоз. – Рига: РПИ. – 1982. – С. 31–34.

152. **Домбровский, А. В.** Опыт производства изделий из ячеистых бетонов по резательной технологии / А. В. Домбровский // Обзорная информация. Отечественный опыт. Сер. 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып. 2. – ВНИИЭСМ, 1985. – С. 46.

153. **Горяйнов, К. Э.** Использование вертикально-направленных ударных импульсов при формовании высоковязких ячеистобетонных смесей / К. Э. Горяйнов, А. В. Домбровский, Ю. Я. Новаков, Н. П. Сажнев // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докл. IV Всесоюз. симпозиума. – Рига. – 1982. – С. 369–371.

154. **Куннос, Г. Я.** Элементы технологической механики ячеистых бетонов / Г. Я. Куннос, В. Х. Лапса, Б. Я. Линденберг. – Рига: Зинатне. – 1976. – С. 12-14.

155. **Удачкин, И. Б.** Новый способ получения ячеистого бетона / И. Б. Удачкин, Т. Н. Назарова, В. В. Васильев // Экспресс-информация. Отечественный опыт. Сер. 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып. 6. – ВНИИЭСМ. – 1983. – С. 36–37.

156. **Горлов, Ю. П.** Получение газобетона способом баротермального вспучивания / Ю. П. Горлов, Ю. Л. Спиринов, А. И. Шунков // Строительные материалы. – 1970. – № 9. – С. 23.

157. **Меркин, А. П.** Трехстадийная поризация ячеистобетонной смеси в производстве теплоизоляционного ячеистого бетона / А. П. Меркин // Экспресс-информация. Отечественный опыт. Сер. 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих. Вып. 4. – ВНИИЭСМ. – 1980. – С. 15–17.

158. **Чистяков Б.З.** Производство газобетонных изделий по резательной технологии / Б. З. Чистяков, И. А. Мысатов, В. И. Бочков. – Л., Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. – 240 с.

159. **Урханова, Л. А.** Повышение эффективности производства силикатных материалов и изделий с использованием механохимической активации известково-кремнеземистых вяжущих / Л. А. Урханова // Техника и технология силикатов. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 2-6.

160. **Любомирский, Н. В.** Оптимизация рецептурно-технологических факторов получения газобетона бездефектной макроструктуры на основе известково-цементного вяжущего / Н. В. Любомирский, В. Т. Шаленный, А. С. Ванюшкин, [и др.] // Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – № 51. – С. 16-22.

161. **Леонтьев, С. В.** Исследование влияния пластифицирующих добавок на процесс стабилизации ячеистой структуры теплоизоляционного газобетона автоклавного твердения / С. В. Леонтьев, В. А. Голубев, В. А. Шаманов, А. Д. Курзанов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-3. – С. 474-479.

162. **Корниенко, П. В.** Теоретические основы образования оптимальной структуры ячеистого бетона / П. В. Корниенко // Наука и техника Казахстана. – 2010. – № 2. – С. 81-89.

163. **Золотарева, Н. Л.** Факторы управления стабильностью газовой фазы при формировании структуры поризованных бетонов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Золотарева Наталия Леонидовна. – Воронеж, 2007. – 20 с.

164. **Золотарева, Н. Л.** Устойчивость газовой фазы и структура поризованного бетона / Н. Л. Золотарева // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 20-21.

165. **Леонтьев, С. В.** Исследование влияния различных газообразователей на формирование структуры теплоизоляционного газобетона автоклавного твердения / С. В. Леонтьев, В. А. Голубев, В. А. Шаманов, А. Д. Курзанов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 5. – С. 206-208.

166. **Volodchenko, A. A.** Designing of mortar compositions on the basis of Dry mixes / A. A. Volodchenko, V. S. Lesovik, L. Kh. Zagorodnyuk, A. N. Volodchenko // Research Journal of Applied Sciences. – 2016. – Vol. 10. – Issue 12. – P. 931-936.

167. **Бедарев, А. А.** Оптимизация структуры газосиликата с применением мультипараметрической модели / А. А. Бедарев, Е. И. Шмитько // Construction materials. – 2013. – № 4. – С 89-93.

168. **Бедарев, А. А.** Мультипараметрическая оптимизация структуры ячеистого силикатного бетона / А. А. Бедарев, Е. И. Шмитько, А. А. Резанов // Magazine of Civil Engineering. – 2013. – № 3(38). – С 15-23.

169. **Бедарев, А. А.** Оптимизация и управление процессами структурообразования ячеистого бетона на основе мультипараметрической модели: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бедарев Анатолий Андреевич. – Воронеж, 2013. – 22 с.

170. **Акимов, А. В.** Разработка ячеистого дисперсно-армированного бетона автоклавного твердения, модифицированного активными минеральными добавками: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Акимов Александр Владимирович. – Иваново, 2016. – 19 с.

171. **Алтынник, Н. И.** Газобетон автоклавного твердения с использованием наноструктурированного модификатора: автореферат дис канд. техн. наук: 05.23.05 / Алтынник Наталья Игоревна. – Белгород, 2013. – 24 с.

172. **Кафтаева, М. В.** Теоретическое обоснование совершенствования автоклавной технологии производства энергоэффективных газосиликатов:

автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Кафтаева Маргарита Владиславна. – Белгород, 2014. – 38 с.

173. **Кафтаева, М. В.** Влияние количественного состава гидросиликатной связки на долговечность автоклавных газосиликатов / М. В. Кафтаева, А. А. Ренгач, С. П. Жигулин, Н. А. Войтеховская // Вестник Калужского университета. – 2019. – № 4(45). – С. 74-77.

174. **Резанов, А. А.** Технологические принципы управления макроструктурообразованием газосиликата с использованием фактора давления внешней газовой среды: автореф... дис. кан. техн. наук: 05.23.05 / Резанов Александр Александрович. – Воронеж, 2011. – 19 с.

175. **Резанов, А. А.** Изучение процесса структурообразования ячеистого силикатного бетона автоклавного твердения и роль внешнего давления окружающей среды в формировании бездефектных структур / А. А. Резанов, А. А. Бедарев, Е. И. Шмитько // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии: Материалы XV академических чтений РААСН. – Казань. – 2010. – Т. 1 – С. 369-373.

176. **Резанов, А. А.** Внешнее давление газовой среды как дополнительный технологический фактор оптимизации процесса порообразования при производстве ячеистых силикатных бетонов / А. А. Резанов // Строительство и архитектура. – 2010. – № 3. – С. 68-78.

177. **Сычев, М. М.** Методы интенсификации гидротермальных процессов в производстве строительных материалов/ М. М. Сычев // Строительные материалы. – 1981. – № 8. – С. 21-24.

178. **Федин, А. А.** Научно-технические основы производства и применения силикатного ячеистого бетона / А. А. Федин. – М.: Изд-во ГАСИС, 2002. – 264 с.

179. **ГОСТ 24316-2022** Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении (с Поправкой). Официальное издание. М.: ФГБУ «РСТ», 2022.

180. **ГОСТ 310.3-76** Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

181. **ГОСТ 12730.2 -2020** Бетоны. Метод определения влажности (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015.

182. **ГОСТ 12852.0-2020** Бетон ячеистый. Общие требования к методам испытаний (с Поправками). Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 8 с.

183. **ГОСТ 27005-2014** Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2015. – 7 с.

184. **ГОСТ 10180-2012** Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.

185. **ГОСТ 24452-2023** Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2024. – 11 с.

186. **ГОСТ 12730.3-2020** Бетоны. Метод определения водопоглощения (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 6 с.

187. **ГОСТ 23732-2011** Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (с Поправкой). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

188. **DIN EN 772-11-2011** Элементы каменной кладки. Методы испытаний. Часть 11. Определение капиллярного водопоглощения элементов каменной кладки из бетона, бетонных блоков заводского изготовления и природного камня, а также первоначального водопоглощения строительного кирпича. Немецкая версия EN 772-11:2011. – 10 с.

189. **ГОСТ 25898-2020** Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2021. – 9 с.

190. **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.

191. **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.

192. **ГОСТ 30515-2013** Цементы. Общие технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 37 с.

193. **ГОСТ 31108-2020** Цементы общестроительные. Технические условия (с Поправкой, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 27 с.

194. **ГОСТ 8736-2014** Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправками, с Изменением N 1). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2020. – 10 с.

195. **ГОСТ 9179-2018** Известь строительная. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 10 с.

196. **ГОСТ 125-2018** Вяжущие гипсовые. Технические условия (с Поправками). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2018. – 9 с.

197. **ГОСТ 4013-2019** Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.

198. **ГОСТ 5494-2022** Пудра алюминиевая. Технические условия. Официальное издание. – М.: ФГБУ «РСТ», 2022. – 15 с.

199. **Сулейманов, К. А.** Процессы гидратообразования в газобетонной смеси / К. А. Сулейманов, В. С. Лесовик, С. А. Коломацкая // В сборнике: Наука и инновации в строительстве, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. В сборнике VII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. С. 220-225.

200. Сулейманов, К. А. Энергетический потенциал газобетонных смесей / К. А. Сулейманов, И. А. Погорелова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 11. С. 8-17.

201. Сулейманов, К. А. Поры воздухововлечения в ячеистобетонной смеси / К. А. Сулейманов, И. А. Погорелова // В книге: Архитектура. Строительство. Информационные технологии - 2023 (АСИТ-2023). Труды I международной научно-практической конференции. Новороссийск, 2023. С. 35-37.

202. Сулейманов, К. А. Поры воздухововлечения в структуре газобетона / К. А. Сулейманов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 12. С. 8-15.

203. Сулейманов, К. А. Исследование макропористой структуры ячеистого бетона / К. А. Сулейманов, В. С. Лесовик, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. № 3. С. 8-16.

204. Гегузин, Я. Е. Пузыри / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 176 с.

205. Сулейманов, К. А. Формирование высокоорганизованной структуры массива в технологии автоклавного ячеистого бетона / К. А. Сулейманов, А. В. Свиначев, Л. А. Сулейманова, А. С. Коломацкий // В сборнике: Современный автоклавный газобетон. VII Международная научно-практическая конференция. – М.: Изд-во Троянт, 2024. – С. 95-102.

206. Мастюков, Ч. И. Эллипсная тригонометрическая функция: монография / Ч.И. Мастюков, Ш.Ч. Мастюков, под научной редакцией Ш.М. Чабдарова. – Казань: Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, 2015. – 176 с.

207. Сулейманова, Л. А. Пористая структура автоклавного газобетона / Л. А. Сулейманова, К. А. Курочкина, А. В. Свиначев, А. С. Коломацкий // Современный автоклавный газобетон: сборник докладов V науч.-практ. конференции. – 2019. – С. 50-55.

208. **Лесовик, В. С.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022662983. Программа расчета состава автоклавных ячеистобетонных изделий / В. С. Лесовик, К. А. Сулейманов, И. С. Рябчевский. Оpubл. 08.07.2022.

209. **Kearsley, E. P.** Wainwright P.J. Porosity and permeability of foamed concrete / E. P. Kearsley // Cem. And Concr. Res. – 2001. – No 5. – P. 805-812.

210. **Намбиар, Е. К. К.** Модели для прогнозирования прочности пенобетона / Е. К. К. Намбиар, К. Рамамурти // J. Mater. Struct. – 2008. – No 41. – P. 247-254.

211. **Хархардин, А. Н.** Структурная топология пенобетона / А. Н. Хархардин // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 5. С. 18-25.

212. **Balshin, M. Y.** Relation of mechanical properties of powder metals and their porosity and the ultimate properties of porous-metal ceramic materials / M. Y. Balshin // Dokl Akad. Sci. USSR. – 1949 – Vol. 67(5). P. 831-834.

213. **Ryshkevitch, R.** Compression strength of porous sintered alumina and zirconia / R. Ryshkevitch // J. Am. Ceram. Soc. – 1953. – Vol. 36(2). – P. 65-68.

214. **Hasselmann, D. P. H.** Griffith flaws and the effect of porosity on tensile strength of brittle ceramics / D. P. H. Hasselmann // J. Am. Ceram. Soc. – 1969 – Vol. 52. – P. 457.

215. **СП 63.13330.2018** Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением N 1, 2). Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2019.

216. **EN 1992** Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. – Brussels: European Committee for Standardization, 2001. – 52 p.

217. **Brady, K. C.** Specification for Foamed Concrete / K.C. Brady, G. R. A. Watts, M. R. Jones. – TRL Limited: Crowthorne, UK, 2001.

218. **Jones, M. R.** Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material / M. R. Jones, A. McCarthy // Mag. Concr. Res. – 2005. – Vol. 57. – P. 21–31.

219. **Saint-Jalmes, A.** Differences between protein and surfactant foams: microscopic properties, stability and coarsening / A. Saint-Jalmes, M. L. Peugeot, H. Ferraz, D. Langevin, // *Colloids Surf.* – 2005. – Vol. 263(1) – P. 219-225.

220. **McCormick, F. C.** Rational proportioning of preformed foam cellular concrete / F. C. McCormick // *ACI. J. Proc.* – 1967. – Vol. 64(2) – P. 104-110.

221. **Патент на изобретение № 2822855.** Способ изготовления изделий из автоклавного газобетона / И.А. Погорелова, К.А. Сулейманов, И.С. Рябчевский. Оpub.: 15.01.2024. Бюл. №20.

222. **Suleymanova, L. A.** Energy efficiency improvement of aerated concrete block wall fences / L. A. Suleymanova, I. A. Pogorelova, K. A. Suleymanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Т. 945. – P. 012006.

223. **Сулейманов, К. А.** Повышение теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков / К. А. Сулейманов, И. А. Погорелова, И. С. Рябчевский // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* – 2022. – № 5. – С. 17-24.

224. **ГОСТ Р 54851-2011** Конструкции строительные ограждающие неоднородные. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче. Официальное издание. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.

225. **Патент на полезную модель № 200967.** Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, И. А. Погорелова, А. С. Коломацкий, К. А. Сулейманов, Д. Монко, В. А. Кулагов. Оpubл.: 20.11.20.

226. **Патент на полезную модель № 200968.** Кладка стен из ячеистобетонных блоков с их фиксацией по шву / Л. А. Сулейманова, И. С. Рябчевский, И. А. Погорелова, К. А. Сулейманов, М. В. Марушко, П. А. Амелин. Оpubл.: 20.11.20.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2022662983**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022662983

**«Программа расчета состава автоклавных
ячеистобетонных изделий»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова) (RU)*

Авторы: *Лесовик Валерий Станиславович (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU)*

Заявка № **2022662030**

Дата поступления **24 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 июля 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Патент на изобретение № 2811671

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2811671

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ
ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Погорелова Инна Александровна (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Лесовик Валерий Станиславович (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU)*

Заявка № **2023115880**

Приоритет изобретения **16 июня 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **15 января 2024 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **16 июня 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



Патент на изобретение № 2822855

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2822855**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ
АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Погорелова Инна Александровна (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023128431

Приоритет изобретения **02 ноября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **15 июля 2024 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **02 ноября 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Патент на полезную модель № 200967

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 200967

КЛАДКА СТЕН ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ С ИХ ФИКСАЦИЕЙ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Коломацкий Александр Сергеевич (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Монко Давид (PL), Кулагов Владимир Александрович (RU)*

Заявка № 2020126437

Приоритет полезной модели **05 августа 2020 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 ноября 2020 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **05 августа 2030 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Патент на полезную модель № 200968

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 200968

КЛАДКА СТЕН ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ С ИХ ФИКСАЦИЕЙ ПО ШВУ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Сулейманова Людмила Александровна (RU), Рябчевский Игорь Сергеевич (RU), Погорелова Инна Александровна (RU), Сулейманов Карим Абдуллаевич (RU), Марушко Михаил Викторович (RU), Амелин Павел Андреевич (RU)*

Заявка № 2020126438

Приоритет полезной модели 05 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 ноября 2020 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 05 августа 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

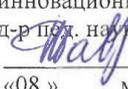
Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Титульный лист стандарта организации
«Газобетон с высокоорганизованной структурой. 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 тех. наук, профессор
 Т. М. Давыденко
«08» мая 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ:

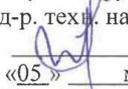
Ректор БГТУ им. В. Г. Шухова
д-р экон. наук, профессор
 С. Н. Глаголев
«08» мая 2023 г.



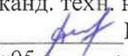
ГАЗОБЕТОН С ВЫСОКООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ

Технические условия
СТО 02066339-068-2023

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
 В.С. Лесовик
«05» мая 2023 г.

Исполнители:

аспирант
 К.А. Сулейманов
«05» мая 2023 г.
канд. техн. наук
 И.А. Погорелова
«05» мая 2023 г.

г. Белгород 2023 г.

**Титульный лист рекомендаций по производству газобетона
с высокоорганизованной структурой**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. Шухова**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р. филол. наук, профессор

Т. М. Давыденко

«08» мая 2023 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по производству газобетона с высокоорганизованной структурой

РАЗРАБОТАНО:

Научный руководитель:

д-р. техн. наук, профессор

В.С. Лесовик

«05» мая 2023 г.

Исполнители:

аспирант

К.А. Сулейманов

«05» мая 2023 г.

канд. техн. наук

И.А. Погорелова

«05» мая 2023 г.

г. Белгород 2023 г.

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «Масикс»

Общество с ограниченной ответственностью «Масикс» (ООО «Масикс»)
 ОГРН 1216100007859, ИНН 6164134558/КПП 616401001, г. Ростов-на-Дону, ул. Шоссейная, дом 2Д, офис 6
 р/с № 40702810112010870986 Филиал «Корпоративный» ПАО «СОВКОМБАНК» г. Москва, к/с № 30101810445230000360, БИК 044525360



УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Масикс»
Шульга С.В.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Сулейманова Карима Абдуллаевича
на тему: «Газобетон с высокоорганизованной структурой»**

Комиссия в составе:

представители ООО «Масикс»

Начальник производства Шевченко И.А.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. каф. СМИиК, д-р техн. наук, проф. Лесовик В.С.,

аспирант Сулейманов К.А.

составили настоящий акт о том, что в рамках проводимой инновационно-технической политики предприятия по совершенствованию технологии получения изделий из ячеистого бетона были использованы результаты диссертационной работы в технологическом процессе по получению высокоорганизованной структуры ячеистого бетона за счет исключения из смеси пор воздухововлечения и сегментных пузырей, а также снижения термических градиентов. Поскольку имеет место воздухововлечение в ячеистобетонную смесь при заливке и образование крупных сегментных пузырей в теле массива оптимизация процесса предварительного твердения массива в существующей камере способствует получению изделий из ячеистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками за счет обеспечения формирования однородной пористой структуры массива газобетона. Эффективность внедрения мероприятий по совершенствованию производства будет определена на основе результатов статистической обработки массива полученных данных.

начальник производства

д-р техн. наук, проф.

аспирант

И.А. Шевченко

В.С. Лесовик

К.А. Сулейманов

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «Сибирский элемент Рента-К»



**Общество с ограниченной ответственностью
«Сибирский элемент Рента - К»**
249850, Калужская обл., Дзержинский район, д. Обухово, д. 1Б
Тел./ факс +7 (4842) 400266, +7 (910) 9111452, +7 (910) 5960053
код по ОКПО 82867409, ОГРН 1084027003170
ИНН 4027087944/ КПП 400401001, E-mail: info@sibelrk.ru
www.sibelrk.ru

«18» апреля 2024 года



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Сибирский элемент «Рента-К»
Регнач А.А.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
«Газобетон с высокоорганизованной структурой»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
Сулейманова Карима Абдуллаевича

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «Сибирский элемент «Рента-К» зам. ген. директора по производству, д-р техн. наук М.В. Кафтаева, главный технолог А.В. Кирсанов, с одной стороны, и представители БГТУ им. В.Г. Шухова д-р техн. наук, проф. В.С. Лесовик, аспирант К.А. Сулейманов, с другой стороны, составили акт о нижеследующем.

Результаты научно-исследовательской работы Сулейманова К.А. приняты к внедрению в производство изделий стеновых из ячеистого бетона в виде технологических приемов и режимов производства ячеистобетонных изделий.

Особенностью получения изделий из ячеистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками является обеспечение высокоорганизованной структуры счет исключения из смеси пор газовыделения сегментных пузырей, наличие которых приводит к нарушению структуры массива ячеистого бетона и к разрывам сплошности (расслоениям).

Эффективность формирования высокоорганизованной структуры также связана с интегральным тепловыделением и снижением термических градиентов, обеспечиваемых созданием термостных условий твердения массива.

Результаты совершенствования производства способствуют повышению качества выпускаемой продукции.

Зам. ген. директора по производству, д-р техн. наук		М.В. Кафтаева
Главный технолог		А.В. Кирсанов
Д-р техн. наук, проф.		В.С. Лесовик
Аспирант		К.А. Сулейманов

Акт о внедрении результатов диссертационной работы предприятия ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Общество с ограниченной ответственностью «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»
ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

Юр. Адрес: 308013, Белгородская обл., г. Белгород, Михайловское шоссе, дом 5

Почтовый адрес: 308501, Белгородская обл., Белгородский р-н,

п. Дубовое, ул. Заводская, д. 4Д

ИНН 3123319466 КПП 312301001 ОГРН 1133123004618 ОКПО 10410443

р/с 40702810207000005679 БИК 041403633 к/с 30101810100000000633

ОТДЕЛЕНИЕ №8592 СБЕРБАНКА РОССИИ Г.БЕЛГОРОД

т. (4722) 57-57-49; 57-57-61



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

И.Н. Соклакова

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Сулейманова Карима Абдуллаевича
на тему: «Газобетон с высокоорганизованной структурой»**

Комиссия в составе:

представители ООО «СТРОЙТЕХНОЛОГИЯ»

начальник строительной лаборатории Агаркова Ю.С.

представители БГТУ им. В.Г. Шухова

зав. каф. СМИиК, д-р техн. наук, проф. Лесовик В.С.,

аспирант Сулейманов К.А.

составили настоящий акт о том, что результаты научной работы использованы при производстве изделий стеновых из ячеистого бетона в виде технологических приемов и режимов производства ячеистобетонных изделий (Заявка на изобретение №2023128431 «Способ изготовления изделий из автоклавного газобетона»), способствующих получению изделий из ячеистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками за счет обеспечения формирования однородной пористой структуры массива газобетона. Осуществление вибрирования массива ячеистого бетона на стадии формирования и выдержки путем погружения в тело массива стержней виброгребня и перемещения виброгребня, осуществляющего вибрирование, вдоль формы с массивом позволяет обеспечить однородную пористую структуру ячеистого бетона. И использованные результаты по рационализации производства ячеистобетонных изделий позволили повысить показатели качества выпускаемой продукции.

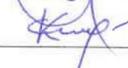
Выпущенная опытная партия блоков стеновых мелких из конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона была использована в качестве наружной ограждающей конструкции при строительстве индивидуального жилого дома по ул. Песчаная в пгт Борисовка Борисовского района Белгородской области.

Начальник строительной лаборатории

д-р техн. наук, проф.

аспирант





Ю.С. Агаркова

В.С. Лесовик

К.А. Сулейманов

Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по цифровой
трансформации и образовательной
деятельности

БГТУ им. В. Г. Шухова
канд. техн. наук, доцент
В. М. Поликов



« 01 » 2024 г.

СПРАВКА

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс**

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы К.А. Сулейманова «Газобетон с высокоорганизованной структурой», 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».

Зам. заведующего кафедрой
строительства и городского хозяйства,
канд. техн. наук, доцент

С.М. Есипов

Директор Инженерно-строительного
института, д-р техн. наук, профессор

В.А. Уваров